

24. 3. 2004

日本国特許庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日 2004年 3月 4日  
Date of Application:

出願番号 特願2004-061427  
Application Number:  
[ST. 10/C]: [JP 2004-061427]

REC'D 21 MAY 2004

WIPO

PCT

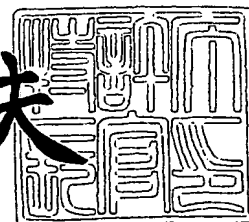
出願人 三菱重工業株式会社  
Applicant(s):

PRIORITY DOCUMENT  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)

2004年 4月30日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

今井康夫



【書類名】 特許願  
【整理番号】 200400181  
【提出日】 平成16年 3月 4日  
【あて先】 特許庁長官殿  
【国際特許分類】 C04B 35/00  
【発明者】  
    【住所又は居所】 神奈川県横浜市金沢区幸浦一丁目 8 番地 1 三菱重工業株式会社  
                        先進技術研究センター内  
    【氏名】 秋山 勝徳  
【発明者】  
    【住所又は居所】 神奈川県横浜市金沢区幸浦一丁目 8 番地 1 三菱重工業株式会社  
                        先進技術研究センター内  
    【氏名】 永野 一郎  
【発明者】  
    【住所又は居所】 神奈川県横浜市金沢区幸浦一丁目 8 番地 1 三菱重工業株式会社  
                        先進技術研究センター内  
    【氏名】 志田 雅人  
【発明者】  
    【住所又は居所】 神奈川県横浜市中区錦町 1 2 番地 菱日エンジニアリング株式会  
                        社内  
    【氏名】 太田 悟志  
【特許出願人】  
    【識別番号】 000006208  
    【氏名又は名称】 三菱重工業株式会社  
【代理人】  
    【識別番号】 100112737  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 藤田 考晴  
【選任した代理人】  
    【識別番号】 100118913  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 上田 邦生  
【先の出願に基づく優先権主張】  
    【出願番号】 特願2003- 85609  
    【出願日】 平成15年 3月26日  
【先の出願に基づく優先権主張】  
    【出願番号】 特願2003-377119  
    【出願日】 平成15年11月 6日  
【手数料の表示】  
    【予納台帳番号】 220022  
    【納付金額】 21,000円  
【その他】 国等の委託研究の成果に係る特許出願（平成15年度新エネルギー・産業技術総合開発機構ナノコーティング技術プロジェクト委託研究、産業活力再生特別措置法第30条の適用を受けるもの）  
【提出物件の目録】  
    【物件名】 特許請求の範囲 1  
    【物件名】 明細書 1  
    【物件名】 図面 1  
    【物件名】 要約書 1  
    【包括委任状番号】 0317197

**【書類名】 特許請求の範囲****【請求項 1】**

母材の表面に被覆される遮熱コーティング膜に適用できる遮熱コーティング材料であって、

組成式  $A_2 B_2 O_7$  (但し、前記構成元素 A は、La, Nd, Sr から選ばれる元素であり、前記構成元素 B が、Ti, Si, Nb, Ta から選ばれる元素である) で表される組成物を主体として含むことを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 2】**

母材の表面に被覆される遮熱コーティング膜に適用できる遮熱コーティング材料であって、

組成式  $X_2 Y O_4$  で表される  $K_2 Ni F_4$  構造を有する組成物を主体として含むことを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 3】**

請求項 2 に記載の遮熱コーティング材料であって、

前記構成元素 X が La 又は Sr であり、構成元素 Y が Ni 又は Ti であることを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 4】**

母材の表面に被覆される遮熱コーティング膜に適用できる遮熱コーティング材料であって、

組成式  $Sr_3 Ti_2 O_7$  又は  $Sr_4 Ti_3 O_{10}$  で表される組成物を主体として含むことを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 5】**

母材の表面に被覆される遮熱コーティング膜に適用できる遮熱コーティング材料であって、

組成式  $La Ta O_4$  で表される組成物を主体として含むことを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 6】**

請求項 1, 3～5 に記載の組成物から選ばれる 2 種類以上を複合化させたセラミック組成物を主体として含むことを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 7】**

母材の表面に被覆される遮熱コーティング膜に適用できる遮熱コーティング材料であって、

組成式  $M_2 Si O_4$  (但し、構成元素 M は 2 価の金属元素) で表されるオリビン型構造を有する組成物を主体として含むことを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 8】**

請求項 7 に記載の遮熱コーティング材料であって、

前記構成元素 M が、Mg 又は Ni であることを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 9】**

母材の表面に被覆される遮熱コーティング膜に適用できる遮熱コーティング材料であって、

組成式  $(MM')_2 Si O_4$  (但し、構成元素 M、M' はいずれも 2 価の金属元素) で表されるオリビン型構造を有する組成物を主体として含むことを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 10】**

請求項 9 に記載の遮熱コーティング材料であって、

前記構成元素 M が、Mg 又は Ni であり、前記構成元素 M' が、Ca, Co, Ni, Fe, Mn から選ばれる金属元素であることを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 11】**

請求項 1 から 10 のいずれか 1 項に記載のセラミック組成物とジルコニア系材料とを複合化させた組成物を主体として含むことを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 12】**

母材の表面に被覆される遮熱コーティング膜に適用できる遮熱コーティング材料であって、

アルカリ土類金属もしくは希土類元素と Nb とからなる酸化物を主体として含むことを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 13】**

請求項 12 に記載の遮熱コーティング材料であって、

前記酸化物が、 $Sr_4Nb_2O_9$ 、 $Sr_5Nb_4O_{15}$ 、 $Ca_2Nb_2O_7$ 、 $YNbO_4$ 、 $LaNbO_4$  から選ばれる酸化物であることを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 14】**

請求項 2 に記載の遮熱コーティング材料であって、

前記組成式  $X_2YO_4$  で表される組成物の構成元素 X が、Pr, Nd, Eu のいずれかであり、前記構成元素 Y が、Ni であることを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 15】**

母材の表面に被覆される遮熱コーティング膜に適用できる遮熱コーティング材料であって、

組成式  $LaTaO_4$  で表される組成物の La を、Al, V, Cr, Fe, Ga, Y, Rh, In, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu から選ばれる金属元素で置換してなる組成物を主体として含むことを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 16】**

母材の表面に被覆される遮熱コーティング膜に適用できる遮熱コーティング材料であって、

アルカリ土類金属と Ta とからなる酸化物を主体として含むことを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 17】**

請求項 16 に記載の遮熱コーティング材料であって、

前記酸化物が、 $Ca_4Ta_2O_9$ 、又は  $BaTa_2O_6$  であることを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 18】**

請求項 13 から 15、および請求項 17 のいずれか 1 項に記載の組成物から選ばれる 2 種類以上の材料を複合化させたセラミックス組成物を主体として含むことを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 19】**

請求項 1、および請求項 3 から 5 のいずれか 1 項に記載の組成物から選ばれる 1 種類以上の材料と、請求項 13 から 15、および請求項 17 のいずれか 1 項に記載の組成物から選ばれる 1 種類以上の材料とを複合化させたセラミックス組成物を主体として含むことを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 20】**

請求項 12 から 17 のいずれか 1 項に記載のセラミック組成物とジルコニア系材料とを複合化させた組成物を主体として含むことを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 21】**

請求項 1 に記載の遮熱コーティング材料であって、

前記酸化物が、 $Sr_2Nb_{2-x}Ti_xO_7$ 、 $Sr_2Nb_{2-x}Zr_xO_7$  ( $0 < x \leq 2$ ) から選ばれる酸化物であることを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 22】**

請求項 12 に記載の遮熱コーティング材料であって、

前記酸化物が、 $Sr_4Nb_{2-x}Ti_xO_9$ 、 $Sr_4Nb_{2-x}Zr_xO_9$  ( $0 < x \leq 2$ ) から選ばれる酸化物であることを特徴とする遮熱コーティング材料。

**【請求項 23】**

請求項 12 に記載の遮熱コーティング材料であって、  
前記酸化物が、 $\text{Ca}_{1-x}\text{Nb}_4\text{O}_{21}$ 、 $\text{La}_3\text{NbO}_7$ 、 $\text{DyNbO}_4$  から選ばれる酸化物であることを特徴とする遮熱コーティング材料。

【請求項 24】

請求項 16 に記載の遮熱コーティング材料であって、  
前記酸化物が、 $\text{BaTa}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_6$ 、 $\text{BaTa}_{2-x}\text{Zr}_x\text{O}_6$  ( $0 < x \leq 2$ ) から選ばれる酸化物であることを特徴とする遮熱コーティング材料。

【請求項 25】

請求項 2 に記載の遮熱コーティング材料であって、  
前記酸化物が、 $\text{La}_{2-x}\text{Ca}_x\text{NiO}_4$  ( $0 < x \leq 2$ ) であることを特徴とする遮熱コーティング材料。

【請求項 26】

母材の表面に被覆される遮熱コーティング膜に適用できる遮熱コーティング材料であって、  
組成式  $\text{SrYb}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Sr}_4\text{Yb}_2\text{O}_9$  から選ばれる酸化物からなることを特徴とする遮熱コーティング材料。

【請求項 27】

母材の表面に被覆される遮熱コーティング膜に適用できる遮熱コーティング材料であって、  
組成式  $\text{J}_6\text{WO}_{12}$ 、 $\text{J}_2\text{WO}_6$  (但し、前記構成元素 J は、希土類元素から選ばれる元素である。) で表される組成物を主体として含むことを特徴とする遮熱コーティング材料。

【請求項 28】

請求項 1、請求項 3 から 5、請求項 13 から 15、請求項 17、請求項 23 から 27 のいずれか 1 項に記載の組成物から選ばれる 2 種類以上の材料を複合化させたセラミックス組成物を主体として含むことを特徴とする遮熱コーティング材料。

【請求項 29】

請求項 21 から 28 のいずれか 1 項に記載のセラミック組成物と、ジルコニア系材料とを複合化させた組成物を主体として含むことを特徴とする遮熱コーティング材料。

【書類名】明細書

【発明の名称】遮熱コーティング材料

【技術分野】

【0001】

本発明は、発電用ガスタービンの動翼、静翼、燃焼器、およびジェットエンジンなどの高温環境下で使用される機器部品に適用可能な遮熱コーティング材料に関する。

【背景技術】

【0002】

ガスタービンやジェットエンジンなどの高効率化のために、その燃焼ガスは高温化の一途をたどっている。そのために金属製部品を高温（例えば1500℃級ガスタービンで翼表面温度は約1400℃）から保護するため、部品の表面には遮熱コーティング（Thermal Barrier Coating: TBC）が施されている。この遮熱コーティングの材料としては、希土類安定化ジルコニアをはじめとする低熱伝導性のセラミックスが用いられている（例えば、特許文献1, 2参照）。上記遮熱コーティングは、金属製部品である基材上に減圧プラズマ溶射等で金属接合層を施した上に大気圧プラズマ溶射により施工される。

【0003】

大気圧プラズマ溶射によって金属製部品上に施された遮熱コーティングは、緻密な組織ではなく内部に多数の気孔を有している。図1に遮熱コーティングの組織の模式図を示す。図1に示すように、遮熱コーティング1の組織中には、径が数十 $\mu\text{m}$ におよぶ大気孔2、径が数 $\mu\text{m}$ 程度の小気孔3、幅の狭い線状の気孔4, 5など、さまざまな形状の気孔が存在している。遮熱コーティング1自体が低熱伝導性のセラミックスであるのと同時に、内部に存在するこのような多数の気孔2~5によって材料の断熱性能が保たれており、基材である金属製部品の高温環境下での使用が可能となっている。

【0004】

遮熱コーティングも含め、高温構造材料として用いる際のジルコニアとは単一組成（ $\text{ZrO}_2$ ）ではなく、安定化剤として希土類酸化物等を数モル%添加した状態（部分安定化ジルコニア）で用いられる。なぜならば安定化剤を添加していない純ジルコニア（ $\text{ZrO}_2$ ）では、

~1000℃      2370℃

単斜晶  $\longleftrightarrow$  正方晶  $\longleftrightarrow$  立方晶

といった2つの相転移があって、そのまま単独では昇降温時に単斜晶、正方晶間の相転移に伴う急激な体積変化が生じ破壊してしまうため、高温構造材料として使用できないのである。そこで希土類酸化物等を数モル%添加し、使用温度域相である正方晶相を低温でも安定化させ、単斜晶相を生成させないようにする必要がある。安定化剤量を制御し、正方晶相を安定化させた部分安定化ジルコニアであっても、高温長時間使用ならびに昇降温を繰り返す熱サイクル時に次第に単斜晶相が析出するという報告もあり、ジルコニアを遮熱コーティングとして使用する際の重要な問題点となっている。

【0005】

ジルコニアに代わる遮熱コーティング材料として、 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ をはじめとする立方晶パイロクロア型構造の材料を適用するという報告（特許文献3~5参照）もある。係る文献では、 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ は、熱伝導率がジルコニアのそれよりも小さいこと、また酸素透過性がジルコニアのそれに比べて小さいことにより、遮熱コーティング材料として好適であるとされている。しかしながら $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ の熱膨張率はジルコニアのそれよりも小さいため、実際には基材となる金属製部品との間に引っ張り応力が残留するであろうという問題を抱えている。

【特許文献1】特開平8-074505号公報

【特許文献2】特開平10-183013号公報

【特許文献3】特開平10-212108号公報

【特許文献4】ヨーロッパ特許第0848077号

【特許文献5】米国特許第6117560号

## 【発明の開示】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0006】

このように、ジルコニア系遮熱コーティング材料には相の安定性確保が不可欠である。また遮熱コーティングとして用いる材料には、融点が高く、熱伝導率が極力小さく、また基材となる金属製部品との間に引っ張り応力を生じさせないように熱膨張率はできる限り金属製部品のそれに近いことが求められる。

## 【0007】

本発明は、上記課題を解決するために成されたものであって、相転移といった問題を抱えず、融点の使用温度域よりも高く、熱伝導率がジルコニアのそれよりも小さく、かつ熱膨張率がジルコニアのそれよりも大きい、新規の遮熱コーティング材料を提供することを目的としている。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0008】

上述したように、使用温度よりも高い融点を持ち、熱伝導率が小さく、熱膨張率の大きい材料を、ジルコニアに代わる新規の遮熱コーティング材料として提供すべく、本発明者らは第一原理計算を用いて材料の探索を行った。前記「第一原理計算」は、量子力学の基礎方程式を解く条件を変えることにより、ナノメートルスケールでの種々の物性値を得る方法である。

## 【0009】

そして本発明者らが、使用温度である1400℃よりも高い融点を持ち、できるだけ熱伝導率が小さく、できるだけ熱膨張率が大きいという条件で計算した結果、ペロブスカイトから派生した斜方晶あるいは単斜晶構造（例えば組成式 $A_2B_2O_7$ で表される板状ペロブスカイト構造）、あるいはc軸/a軸比が3以上である正方晶の層状構造（例えば $K_2NiF_4$ 構造や $Sr_3Ti_2O_7$ 構造、 $Sr_4Ti_3O_{10}$ 構造）のもの、さらには組成式 $LaTaO_4$ で表されるものにおいて前記要求を満たし得ることを見出した。それらの材料はホタル石型構造を持つジルコニア系材料や立方晶パイロクロア系材料に比べ結晶構造が複雑であることから低熱伝導性を示すことが期待でき、また一軸方向に長いことから高熱膨張性を示すことが期待でき、新規の遮熱コーティング材料として適していると考えられる。

## 【0010】

前記組成式 $A_2B_2O_7$ で表されるペロブスカイトから派生した構造を有する本発明の遮熱コーティング材料においては、前記構成元素Aは、La, Nd, Srのいずれかより選択され、前記構成元素BがTi, Si, Nb, Taのいずれかより選択されることが好ましい。これらの元素を用いることで、ジルコニアに比して熱膨張率が大きく、かつ熱伝導率が小さい、遮熱コーティング膜を形成するのに好適な材料が得られることが本発明者らにより確認されている。

## 【0011】

また、前記 $K_2NiF_4$ 構造を有し、組成式 $X_2YO_4$ で表される本発明の遮熱コーティング材料において、前記構成元素Xは、La又はSrとされ、構成元素Yは、Ni又はTiとされることが好ましい。これらの元素を用いることで、ジルコニアに比して熱膨張率が大きく、かつ熱伝導率が小さい、遮熱コーティング膜を形成するのに好適な材料が得られることが本発明者らにより確認されている。

## 【0012】

上記に挙げた遮熱コーティング材料は、それだけで十分に高熱膨張性、低熱伝導性を発揮するが、これらの組成物から選ばれる2種類以上の組成物を複合化したとしても、その高熱膨張性、低熱伝導性を損なわないであろうことは容易に推定でき、遮熱コーティング材料として十分適していると考えられる。あるいは、上記遮熱コーティング材料、あるいはそれらを複合化した材料に、他の元素を添加したとしても、結晶構造を損なわない程度であれば、その高熱膨張性、低熱伝導性を損なわないであろうことは容易に推定できる。

## 【0013】

また別途調査・研究を行った結果、本発明者らは組成式 $M_2SiO_4$ もしくは $(MM')_2SiO_4$ （ただしM、M'は2価の金属元素）で表されるオリビン型構造をもった材料が、使用温度よりも高い融点を持ち、熱伝導率が小さく、熱膨張率が大きいという条件に合致することを見出した。特に前記構成元素Mが、Mg又はNiであり、前記構成元素M'がCa、Co、Ni、Fe、Mnから選ばれる金属元素であるのが望ましい。これらの金属元素は、その多くが天然に安定に存在する橄欖石群の鉱物である。また特に、上記金属元素のうちでも、Mg、Caは希土類に比べ価格も安価である。

## 【0014】

さらに $M_2SiO_4$ は密度がジルコニアのそれに比べ1/2～5/6程度であるため、遮熱コーティング膜として施工した際の総重量の軽減が図れ、ガスタービン等の効率に好影響を及ぼすことが期待でき、実用的にも適っている。

## 【0015】

さらに本発明において計算ならびに調査・研究によって導き出したこれらの材料は、それだけで十分に高熱膨張性、低熱伝導性を発揮するが、現用のジルコニア系材料と複合化して用いても、後述の実施例中で説明する複合化の式に従えば、その高熱膨張性、低熱伝導性を損なわないであろうことは容易に推定でき、ジルコニア系材料と複合化した場合でも遮熱コーティング材料として十分適していると考えられる。

## 【0016】

また本発明者らは、先に記載した遮熱コーティングとして好適な材料としての条件を満たす組成物の探索をさらに行った結果、アルカリ土類金属もしくは希土類元素と、Nbとからなる酸化物を主体として含む材料、及び組成式 $LaTaO_4$ で表される組成物のLaを、Al、V、Cr、Fe、Ga、Y、Rh、In、Ce、Nd、Sm、Eu、Gd、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Luから選ばれる金属元素で置換してなる組成物を主体として含む材料、並びに、アルカリ土類金属とTaとからなる酸化物を主体として含む材料において前記要求を満たし得ることを知見した。

## 【0017】

上記アルカリ土類金属もしくは希土類元素とNbとからなる酸化物としては、 $Sr_4Nb_2O_9$ 、 $Sr_5Nb_4O_{15}$ 、 $Ca_2Nb_2O_7$ 、 $YNbO_4$ 、 $LaNbO_4$ から選ばれる酸化物が好ましいことを確認した。また上記アルカリ土類金属とTaとからなる酸化物としては、 $Ca_4Ta_2O_9$ 、又は $BaTa_2O_6$ が好ましいことを確認した。

## 【0018】

またさらに、本発明者らは、先に記載の前記組成式 $X_2YO_4$ で表される組成物を含む遮熱コーティング材料においては、前記構成元素Xが、Pr、Nd、Euのいずれかであり、前記構成元素Yが、Niであることが好ましいことを確認した。

## 【0019】

上記した本発明に係る遮熱コーティング材料を構成し得る組成物は、互いに、あるいはジルコニア系材料と複合化して用いることができる。すなわち、アルカリ土類金属もしくは希土類元素とNbとからなる酸化物、組成式 $LaTaO_4$ で表される組成物のLaを他の金属元素で置換した組成物、及び $Ca_4Ta_2O_9$ 、 $BaTa_2O_6$ （アルカリ土類金属とTaとからなる酸化物）は、互いに複合化して用いることが可能であり、また公知のジルコニア系材料と複合化して用いることもできる。そして、これらのセラミック組成物は、先に記載した組成式 $A_2B_2O_7$ （但し、前記構成元素Aは、La、Nd、Srから選ばれる元素であり、前記構成元素Bが、Ti、Si、Nb、Taから選ばれる元素である）で表される組成物、組成式 $X_2YO_4$ で表される $K_2NiF_4$ 構造を有し、前記構成元素XがLa又はSrであり、構成元素YがNi又はTiである組成物、組成式 $Sr_3Ti_2O_7$ 又は $Sr_4Ti_3O_{10}$ で表される組成物、及び組成式 $LaTaO_4$ で表される組成物と複合化しても、遮熱コーティング材料として好適に用いることができる。

## 【0020】

一方、先に記述したSr-Nb系複合酸化物である $Sr_2Nb_2O_7$ 、および $Sr_4N$



$\text{Nb}_2\text{O}_9$  は、そのNbサイトをTiやZrで置換固溶することによって、さらに低熱伝導化を図ることができる。すなわち、前記酸化物としては、 $\text{Sr}_2\text{Nb}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_7$  ( $0 < x \leq 2$ )、又は $\text{Sr}_2\text{Nb}_{2-x}\text{Zr}_x\text{O}_7$  ( $0 < x \leq 2$ )、もしくは $\text{Sr}_4\text{Nb}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_9$  ( $0 < x \leq 2$ )、又は $\text{Sr}_4\text{Nb}_{2-x}\text{Zr}_x\text{O}_9$  ( $0 < x \leq 2$ )で示される酸化物であってもよい。

これはNbの最も安定な電子状態である5価の一部を4価で置き換えることになるので酸素欠陥が生成し、結晶構造がさらに複雑な状態になるので、フォノン散乱をより抑制し、熱の伝達を妨げるためである。しかし、4価の電子状態を持つ元素は他にも多く存在するが、その他の元素では4価の時のイオン半径が適当ではないために、 $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ 、および $\text{Sr}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ の構造を保持することができない。従って、Nbサイトを置換固溶する元素としてはTiやZrが選択される。

#### 【0021】

さらに、 $\text{SrYb}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Sr}_4\text{Yb}_2\text{O}_9$ や、 $\text{Ca}_{11}\text{Nb}_4\text{O}_{21}$ 、 $\text{La}_3\text{NbO}_7$ 、 $\text{DyNbO}_4$ は、これまでに説明した結晶構造と類似の構造を保持するために低熱伝導率となり、遮熱コーティング材料として好適に用いることができる。

#### 【0022】

また、Sr-Nb系複合酸化物と同様に、 $\text{BaTa}_2\text{O}_6$ はそのTaサイトをTiやZrで置換固溶することによって、さらに低熱伝導化を図ることができる。すなわち、 $\text{BaTa}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_6$ 、又は $\text{BaTa}_{2-x}\text{Zr}_x\text{O}_6$  ( $0 < x \leq 2$ )で示される酸化物とすることができる。

この場合、Nbの最も安定な電子状態である5価の一部を4価で置き換えることになるので酸素欠陥が生成し、結晶構造がさらに複雑な状態になるので、フォノン散乱をより抑制し、熱の伝達を妨げるためである。しかし、4価の電子状態を持つ元素は他にも多く存在するが、その他の元素では4価の時のイオン半径が適当ではないために、 $\text{BaTa}_2\text{O}_6$ の構造を保持することができない。従って、Taサイトを置換固溶する元素としてはTiやZrが選択される。

#### 【0023】

また、上記Ba-Ta系複合酸化物と同様に、 $\text{LaNiO}_4$ はそのLaサイトをCaで置換固溶することによって、さらに低熱伝導化を図ることができる。すなわち、 $\text{La}_{2-x}\text{Ca}_x\text{NiO}_4$  ( $0 < x \leq 2$ )で示される酸化物とすることができる。

この場合、Laの最も安定な電子状態である3価の一部を2価で置き換えることになるので酸素欠陥が生成し、結晶構造がさらに複雑な状態になるので、フォノン散乱をより抑制し、熱の伝達を妨げるためである。しかし、2価の電子状態を持つ元素は他にも多く存在するが、その他の元素では2価の時のイオン半径が適当ではないために、 $\text{LaNiO}_4$ の構造を保持することができない。従って、Laサイトを置換固溶する元素としてはCaが選択される。

#### 【0024】

またさらに、本発明の遮熱コーティング材料は、タングステン酸化物を含む複合酸化物を主体としてなるものとすることができる。すなわち、組成式 $\text{J}_6\text{WO}_{12}$ 、 $\text{J}_2\text{WO}_6$ （但し、前記構成元素Jは、希土類元素から選ばれる元素である。）で表される組成物を主体として含むものとすることができる。

#### 【0025】

上記した本発明に係る遮熱コーティング材料を構成し得る組成物は、互いに、あるいはジルコニア系材料と複合化して用いることができる。すなわち、Sr-Nb系複合酸化物である $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ 、および $\text{Sr}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ において、そのNbサイトをTiやZrで置換固溶したもの、および $\text{SrYb}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Sr}_4\text{Yb}_2\text{O}_9$ や、 $\text{Ca}_{11}\text{Nb}_4\text{O}_{21}$ 、 $\text{La}_3\text{NbO}_7$ 、 $\text{DyNbO}_4$ 、および $\text{BaTa}_2\text{O}_6$ はそのTaサイトをTiやZrで置換固溶したもの、および $\text{LaNiO}_4$ はそのLaサイトをCaで置換固溶したものと複合化しても、遮熱コーティング材料として好適に用いることができる。

#### 【0026】

次に、本発明の耐熱部材は、先に記載の本発明の遮熱コーティング材料を用いた遮熱コーティング膜を基材上に形成したことを特徴としている。この構成によれば、現用のジルコニアに比して、高い熱膨張率と、低い熱伝導率を示す、本発明の遮熱コーティング材料で構成された被膜を有することで、優れた耐熱性を奏するとともに、温度サイクル時の被膜の耐剥離性にも優れ、長時間の使用に耐える耐熱部材を提供することができる。

#### 【発明の効果】

##### 【0027】

以上、詳細に説明したように、本発明によれば、組成式  $A_2 B_2 O_7$  で表される組成物（特に構成元素  $A = La, Nd, Sr$  であり構成元素  $B = Ti, Si, Nb, Ta$  である組成物）、また組成式  $X_2 YO_4$  で表される  $K_2 NiF_4$  構造を有する組成物（特に構成元素  $X = La, Sr$  であり、構成元素  $Y = Ni, Ti$  である組成物）、また  $Sr_3 Ti_2 O_7$ 、 $Sr_4 Ti_3 O_{10}$ 、あるいは  $LaTaO_4$  で表される組成物、さらにこれらの組成物を2種類あるいはそれ以上複合した組成物を主体として含んでいることで、現用のジルコニアにくらべ、高熱膨張率かつ低熱伝導率を示す、遮熱コーティング膜に用いて好適な材料を提供することができる。

##### 【0028】

また本発明によれば、組成式  $M_2 SiO_4$  あるいは  $(MM')_2 SiO_4$  で表されるオリビン型構造をもった組成物（特に、構成元素  $M = Mg, Ni$ 、ならびに構成元素  $M' = Ca, Co, Ni, Fe, Mn$  である組成物）を主体として含んでいることで、現用のジルコニアにくらべ高熱膨張率かつ低熱伝導率を示し、さらに軽量であり、安価な遮熱コーティング材料を提供することができる。

##### 【0029】

また本発明によれば、アルカリ土類金属もしくは希土類元素と、Nbとからなる酸化物、または、組成式  $LaTaO_4$  で表される組成物のLaを、Al, V, Cr, Fe, Ga, Y, Rh, In, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Luから選ばれる金属元素で置換してなる組成物、あるいは、アルカリ土類金属とTaとからなる酸化物を含むものとすることで、現用のジルコニアに比べ高熱膨張率かつ低熱伝導率を示す遮熱コーティング材料を提供することができる。

##### 【0030】

さらに本発明によれば、上述したセラミック組成物を相互に、あるいは公知のジルコニア系材料と複合化した材料を含む構成とすることで、上記熱膨張率及び熱伝導率がさらに適切な範囲に制御された遮熱コーティング材料を提供することができる。

#### 【発明を実施するための最良の形態】

##### 【0031】

以下に本発明の実施の形態を、図表を参照しながら説明する。

##### 【実施例1】

量子力学の基礎方程式を解く条件を変えることにより、ナノメートルスケールでの種々の物性値が得られる事が知られている。この手法は、実験結果を計算のパラメーターとして一切用いないという、非経験的な計算を行い、求める情報を得るという研究手法であり、「第一原理計算」と呼ばれている。本発明においては、この第一原理計算を、結晶構造から熱膨張率  $\alpha$  と熱伝導率  $\lambda$  とを推定するために用いた。

(出典: "http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt009j/feature3.html#4-0", 「科学技術動向」 2001年12月号, 文部科学省 科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター)

##### 【0032】

まず、本発明者らは、第一原理計算により、結晶構造から推定される熱膨張率  $\alpha$ 、及び熱伝導率  $\lambda$  について検討し、組成式  $Nd_2 Ti_2 O_7$ ,  $La_2 Si_2 O_7$ ,  $La_2 Ti_2 O_7$ ,  $Sr_2 Nb_2 O_7$ ,  $Sr_2 Ta_2 O_7$ ,  $Sr_3 Ti_2 O_7$ ,  $La_2 NiO_4$ ,  $LaTaO_4$  で表される組成物を選定した。

##### 【0033】

そして、それぞれの構成元素の酸化物または炭酸塩を出発原料に選び、所定比となるように秤量し、ボールミルを用いて固相混合した。混合粉を乾燥した後、1200℃で仮焼した。得られた仮焼粉を粉末X線回折により同定したところ、未反応原料成分は残っておらず、すべての試料で単相になっていることが確認された。

#### 【0034】

次いで、上記各試料を1400℃で焼成し、その焼結体から4×4×15mmの棒状試料を切出して、熱膨張率を測定した。1000℃における熱膨張率の値を表1に示す。なお比較材として3YSZ (3mol%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>: イットリア部分安定化ジルコニア) の熱膨張率の値も表中に記載した。

#### 【0035】

【表1】

材料名	熱膨張率 [×10 <sup>-6</sup> /℃]
3YSZ (比較材)	9.92
Nd <sub>2</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	10.01
La <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	7.97
La <sub>2</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	9.60
Sr <sub>2</sub> Nb <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	10.77
Sr <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	7.93
Sr <sub>3</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	11.99
La <sub>2</sub> NiO <sub>4</sub>	13.98
LaTaO <sub>4</sub>	5.33

#### 【0036】

作製した試料のうち、Nd<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, Sr<sub>2</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, Sr<sub>3</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, La<sub>2</sub>NiO<sub>4</sub>において熱膨張率が3YSZのそれよりも大きな値を示している。このことは、これらの材料を遮熱コーティングとして使用した場合、下地の金属製部品との間に引張り応力を生じる可能性が現用のジルコニアよりも小さいということを示唆している。

#### 【0037】

次に、Nd<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, La<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, La<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, Sr<sub>2</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, Sr<sub>2</sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, Sr<sub>3</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, La<sub>2</sub>NiO<sub>4</sub>, LaTaO<sub>4</sub>について、1400℃で焼成し、その焼結体から直径10mmφ、厚さ1mmの円盤状試料を切出し、レーザーフラッシュ法により、熱伝導率を測定した。室温における熱伝導率の値を表2に示す。なお比較材として3YSZの熱伝導率の値(1000℃、文献値)も表中に記載した。

#### 【0038】

【表 2】

材料名	熱伝導率
	[W/mK]
3YSZ (比較材)	2.2 (1000℃、文献値)
$\text{Nd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$	2.57
$\text{La}_2\text{Si}_2\text{O}_7$	1.68
$\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$	2.28
$\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$	1.74
$\text{Sr}_2\text{Ta}_2\text{O}_7$	2.99
$\text{Sr}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$	5.64
$\text{La}_2\text{NiO}_4$	2.66
$\text{LaTaO}_4$	2.11

## 【0039】

材料の熱伝導率 $\lambda$ と比熱 $C$ 、熱伝達媒体（フォノン）の平均自由行程 $L$ 、その運動速度 $v$ との間には、下記に示す（1）式の関係がある。フォノンの平均自由行程 $L$ は絶対温度 $T$ と逆比例する（ $L \propto (1/T)$ ）ため、セラミックスの場合、（1）式は、下記（2）式（ただし $A$ は比例定数）のように表され、温度上昇とともに熱伝導率は減少する傾向を示す。

## 【0040】

$$\lambda \propto C \cdot L \cdot v \quad \dots (1)$$

## 【0041】

$$\lambda = A \cdot (C \cdot L \cdot v) / T \quad \dots (2)$$

## 【0042】

表2に掲げた $\text{Nd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 、 $\text{La}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ 、 $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 、 $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ 、 $\text{Sr}_2\text{Ta}_2\text{O}_7$ 、 $\text{Sr}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$ 、 $\text{La}_2\text{NiO}_4$ の熱伝導率は室温（ $\sim 300\text{K}$ ）で測定した値である。（2）式によれば、これらの材料の $1000^\circ\text{C}$ （ $1273\text{K}$ ）における熱伝導率は室温時の値の約 $1/4$ になることが推定できる。その $1000^\circ\text{C}$ における推定熱伝導率値を表3に示す。

表3に示すように、これらの材料の $1000^\circ\text{C}$ における熱伝導率はいずれもジルコニアのそれよりも小さいと推定でき、遮熱コーティング材料として適していると考えられる。

## 【0043】

【表3】

材料名	1000℃における推定熱伝導率 [W/mK]
3YSZ (比較材)	2.2 (1000℃、文献値)
$\text{Nd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$	0.643
$\text{La}_2\text{Si}_2\text{O}_7$	0.420
$\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$	0.570
$\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$	0.435
$\text{Sr}_2\text{Ta}_2\text{O}_7$	0.748
$\text{Sr}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$	1.41
$\text{La}_2\text{NiO}_4$	0.665
$\text{LaTaO}_4$	0.528

【0044】

【実施例2】

本実施例では、上記実施例1で熱膨張率、熱伝導率を測定した材料の複合化することを検討した。

実施例1によれば $\text{La}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ 、 $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 、 $\text{Sr}_2\text{Ta}_2\text{O}_7$ および $\text{LaTaO}_4$ は、そのままでは熱膨張率がジルコニアのそれよりも小さいため、遮熱コーティング材料として用いた場合に引っ張り応力が生じるおそれがある。そこで、これらの材料の低熱伝導性を維持したまま高熱膨張率化を図るため、表1に掲げた他の高熱膨張率材料との複合化を検討した。

【0045】

熱膨張率差の大きい2種類のセラミックスを複合化する際に、その複合材の熱膨張率( $\alpha_c$ )はTurnerの式と呼ばれる以下の(3)式で表される。(3)式中、 $\alpha$ は熱膨張率、 $K$ は体積弾性率、 $V$ は体積分率、添え字 $m$ はマトリクス、添え字 $p$ は添加する相である。

【0046】

$$\alpha_c = (\alpha_p V_p K_p + \alpha_m V_m K_m) / (V_p K_p + V_m K_m) \quad \dots (3)$$

【0047】

また複合材の熱伝導率( $\lambda_c$ )はMaxwell-Euckenの式と呼ばれる以下の(4)式で表される。(4)式中、 $\lambda$ は熱伝導率、 $V$ は体積分率、添え字 $m$ はマトリクス、添え字 $p$ は添加する相である。

【0048】

$$\lambda_c = \lambda_m \{1 + 2V_p (1 - \lambda_m / \lambda_p) / (2\lambda_m / \lambda_p + 1)\} / \{1 - V_p (1 - \lambda_m / \lambda_p) / (\lambda_m / \lambda_p + 1)\} \quad \dots (4)$$

【0049】

いま例えば表1、2中に示した低熱膨張性(低熱伝導性)材料 $\text{LaTaO}_4$ ( $\alpha=5.33$ 、 $\lambda=2.11$ )を高熱膨張性(高熱伝導性)材料である $\text{Sr}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$ ( $\alpha=11.99$ 、 $\lambda=5.64$ )に複合化させるとする。すなわち $\text{Sr}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$ をマトリクス、 $\text{LaTaO}_4$ を添加する相とする。 $\text{LaTaO}_4$ を10vol%添加することにする

と  $V_p = 0.1$ 、また  $Sr_3Ti_2O_7$  および  $LaTaO_4$  の体積弾性率はそれぞれ  $K_m = 146.7$ 、 $K_p = 213.6$  である。

これらの数値を (3) 式、(4) 式に代入すると、

$$(3) \text{ 式より } \alpha_c = 11.06$$

$$(4) \text{ 式より } \lambda_c = 5.11$$

となる。 $\lambda_c = 5.11$  は室温熱伝導率であるから、 $1000^\circ\text{C}$  における熱伝導率は約  $1/4$  になると推定すると  $\lambda = 1.28$  となる。これは熱膨張率、熱伝導率とも現用のジルコニア系材料のそれらにくらべて遮熱コーティングとして有利な値である。

#### 【0050】

このように2種類の材料を複合化させることにより、熱膨張率、熱伝導率とも両者の間を取ることができ、その値は体積分率を適正に定めることにより制御できることが分かる。そしてここでは、例として  $Sr_3Ti_2O_7$  と  $LaTaO_4$  を複合化する場合を計算したが、表中に掲げた他の材料についても同様の検討を行うことにより熱膨張率、熱伝導率を制御できることは容易に推定できる。

従って、表1および2に掲げた材料を2種類あるいはそれ以上複合化させた材料も、遮熱コーティング材料として十分適していると考えられる。

#### 【0051】

##### 【実施例3】

$Mg_2SiO_4$  は、絶縁材料としてIC基板やパッケージ等の電子・電気機器に使用されているが、遮熱コーティングをはじめとする高温構造材料に使用された例はない。本発明者らは  $Mg_2SiO_4$  のもつ高熱膨張性および低熱伝導性に着目し、遮熱コーティングへの適用を考え、まず  $Mg_2SiO_4$  ならびにその類似化合物について調査した。

#### 【0052】

$Mg_2SiO_4$  は鉱物名Forsteriteと呼ばれ、斜方晶、空間群Pmnbで分類される  $M_2SiO_4$  (Mは2価の金属元素) のオリビン型構造をとる材料に属する。このような斜方晶、空間群Pmnbで分類されるオリビン型構造をとる材料には、他に  $Fe_2SiO_4$  (鉱物名Fayalite)、 $Mn_2SiO_4$  (鉱物名Tephroite)、 $Ni_2SiO_4$  (鉱物名Liebenbergite)、 $Co_2SiO_4$  等がある。

#### 【0053】

上記組成式中Mで表されている2価の金属元素は特に1種類である必要はなく、 $(M, M')_2SiO_4$  の形、例えば  $(Fe, Mg)_2SiO_4$  (鉱物名Olivine)、 $(Ca, Mg)_2SiO_4$  (鉱物名Monticellite)、 $(Fe, Mn)_2SiO_4$  (鉱物名Knebelite)、 $(Ca, Mn)_2SiO_4$  (鉱物名Glaucochroite)、 $(Ca, Fe)_2SiO_4$  (鉱物名Kirschsteinite) 等の材料も存在する。この2価の金属元素の部分は  $(M, M')_2$  でという形で示されるように、MとM'が必ずしも1:1の比をとるとは限らず、任意の比を取ることができる。

#### 【0054】

これらの  $M_2SiO_4$  あるいは  $(M, M')_2SiO_4$  で表される材料について熱的安定性を調べた。各材料の状態図を、図2から図11に示す。またそれぞれの状態図から読み取れる融点(または分解温度)を表4に示す。尚、図2から図11の各状態図の出典については、表9に記載している。

#### 【0055】

【表4】

材料名	融点 (または分解温度) [°C]
$Mg_2SiO_4$	1890
$Fe_2SiO_4$	1205
$Mn_2SiO_4$	1345
$Ni_2SiO_4$	1545
$Co_2SiO_4$	1420
$(Fe, Mg)_2SiO_4$	1205~1890
$(Ca, Mg)_2SiO_4$	1430~1490
$(Fe, Mn)_2SiO_4$	1205~1250
$(Mg, Mn)_2SiO_4$	1345~1890
$(Mg, Ni)_2SiO_4$	1630~1890
$CaMnSiO_4$	1355
$CaFeSiO_4$	1230

## 【0056】

遮熱コーティングとして使用することを考えると、これらのうち融点が1400℃よりも低い $Fe_2SiO_4$ 、 $Mn_2SiO_4$ 、 $(Fe, Mn)_2SiO_4$ 、 $CaMnSiO_4$ 、 $CaFeSiO_4$ は、明らかに不適切である。しかしながら例えば $(Fe, Mg)_2SiO_4$ の場合で分かるように、高融点の $Mg_2SiO_4$ と低融点の $Fe_2SiO_4$ を複合化させることにより、その中間の融点をもった $(Fe, Mg)_2SiO_4$ を作ることが可能である。そしてその融点をFeとMgの比率で制御できることは図7のFeO-MgO-SiO<sub>2</sub>系状態図から読み取れる。従って、FeとMgの場合以外でも(M, M')<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>のMとM'の元素の組み合わせならびにその比率により所望の融点をもった材料を得ることが可能となることは容易に推測できる。

## 【0057】

そこで、組成式 $Mg_2SiO_4$ 、 $Ni_2SiO_4$ 、 $Co_2SiO_4$ 、 $(Ca, Mg)_2SiO_4$ 、 $(Mg, Co)_2SiO_4$ 、 $(Mg, Ni)_2SiO_4$ 、 $(Ni, Co)_2SiO_4$ で表される組成物について、各構成元素の酸化物粉体を所定比となるように秤量し、ボールミルを用いて固相混合した後、乾燥させて1200℃で仮焼することにより、仮焼粉を作製した。それらの仮焼粉を粉末X線回折にて同定したところ、SiO<sub>2</sub>等の未反応原料成分は残っておらず、すべての試料で単相になっていることが確認された。

## 【0058】

表4で掲げた材料についてその理論密度を表5に示す。ただしそれらの材料のうち融点が1400℃よりも低いため遮熱コーティングとしての使用が不適切であるものは省略した。また上記で作製した $Mg_2SiO_4$ 、 $Ni_2SiO_4$ 、 $Co_2SiO_4$ 、 $(Ca, Mg)_2SiO_4$ 、 $(Mg, Co)_2SiO_4$ 、 $(Mg, Ni)_2SiO_4$ 、 $(Ni, Co)_2SiO_4$ の各仮焼粉について1400℃で焼成し、その焼結体の密度を測定した結果

も表5に記載する。ただし、これらのうち $\text{Co}_2\text{SiO}_4$ は焼結体の一部が熔融してしまったため測定から除外した。さらに比較材として3YSZ (3mol% $\text{Y}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$ : イットリア部分安定化ジルコニア) の密度の値も表中に記載した。

【0059】

【表5】

材料名	理論密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	測定密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	相対密度 [%]
3YSZ (比較材)	~6.00	5.844	~97.4
$\text{Mg}_2\text{SiO}_4$	3.222	2.538	78.22
$\text{Ni}_2\text{SiO}_4$	4.923	4.040	82.06
$\text{Co}_2\text{SiO}_4$	4.708	—	—
$(\text{Ca}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$	3.057	2.374	89.43
$(\text{Mg}, \text{Co})_2\text{SiO}_4$	~3.97	3.722	~93.8
$(\text{Mg}, \text{Ni})_2\text{SiO}_4$	~4.07	3.088	~75.9
$(\text{Ni}, \text{Co})_2\text{SiO}_4$	~4.82	4.249	~88.2

【0060】

比較材として提示した3YSZの相対密度が約97%であり、ほとんど緻密体になっているのに比べ、他の材料では相対密度が75~94%と低い値を示した。これは $\text{M}_2\text{SiO}_4$ および $(\text{MM}')_2\text{SiO}_4$ 系の材料がジルコニアに比べると全般的に難焼結性であると推定できる。遮熱コーティングとして金属部品に溶射された場合、その組織は図1で示したように多数の気孔をもった状態となる。そしてそのような多数の気孔の存在により、材料の断熱性能が保てるのであるから、現用のジルコニアに比べ緻密になりにくいと思われるこれら $\text{M}_2\text{SiO}_4$ および $(\text{MM}')_2\text{SiO}_4$ のオリビン型構造をもった材料は、遮熱コーティングとして適していると考えられる。

【0061】

またいずれの材料も理論密度がジルコニアのその1/2~5/6程度であるため、遮熱コーティングとして施工した際に重量の軽減が図れ、ガスタービン等の効率に好影響を及ぼすことが期待できるため、そのような点でもこれらの材料は実用的に適していると考えられる。

【0062】

【実施例4】

次に、組成式 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 、 $\text{Ni}_2\text{SiO}_4$ 、 $(\text{Ca}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$ 、 $(\text{Mg}, \text{Co})_2\text{SiO}_4$ 、 $(\text{Mg}, \text{Ni})_2\text{SiO}_4$ 、 $(\text{Ni}, \text{Co})_2\text{SiO}_4$ で表される組成物を、1400℃で焼成して作製し、得られた各焼結体から4×4×15mmの棒状試料を切出して、熱膨張率を測定した。1000℃における熱膨張率の値を表6に示す。なお比較材として3YSZの熱膨張率の値も表中に記載した。

【0063】



【表6】

材料名	熱膨張率 [ $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]
3 Y S Z (比較材)	9. 9 2
$\text{Mg}_2\text{SiO}_4$	11. 59
$\text{Ni}_2\text{SiO}_4$	12. 59
$(\text{Ca}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$	11. 89
$(\text{Mg}, \text{Co})_2\text{SiO}_4$	11. 40
$(\text{Mg}, \text{Ni})_2\text{SiO}_4$	10. 97
$(\text{Ni}, \text{Co})_2\text{SiO}_4$	10. 42

## 【0064】

表6に示すように、作製したいずれの試料も熱膨張率は3 Y S Zのそれよりも大きな値を示している。これは遮熱コーティングとして使用した際、下地の金属製部品との間に引っ張り応力を生じる可能性が現用のジルコニアよりも小さいということを示唆している。したがってこの点でもこれら $\text{M}_2\text{SiO}_4$  および  $(\text{MM}')_2\text{SiO}_4$  のオリビン型構造をもった材料は遮熱コーティングとして適していると考えられる。

## 【0065】

次に、組成式 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 、 $\text{Ni}_2\text{SiO}_4$ 、 $(\text{Ca}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$ 、 $(\text{Mg}, \text{Co})_2\text{SiO}_4$  で表される組成物を1400℃で焼成して作製し、得られた各焼結体から直径10mmφ、厚さ1mmの円盤状試料を切出し、レーザーフラッシュ法により、熱伝導率を測定した。室温における熱伝導率の値を表7に示す。なお比較材として3 Y S Zの熱伝導率の値(1000℃、文献値)も表中に記載した。

## 【0066】

【表7】

材料名	熱伝導率 [W/mK]
3YSZ (比較材)	2.2 (1000℃、文献値)
$Mg_2SiO_4$	4.00
$Ni_2SiO_4$	8.52
$(Ca, Mg)_2SiO_4$	3.85
$(Mg, Co)_2SiO_4$	3.29

## 【0067】

先の実施例1の中で述べたのと同様の考察を行うと、表7に掲げた $Mg_2SiO_4$ 、 $Ni_2SiO_4$ 、 $(Ca, Mg)_2SiO_4$ 、 $(Mg, Co)_2SiO_4$ の室温(～300 K)で測定した熱伝導率値に対し、1000℃(1273 K)における熱伝導率はそれら室温時の値の約1/4になることが推定できる。1000℃における推定熱伝導率値を表8に示す。

## 【0068】

【表8】

材料名	1000℃における推定熱伝導率 [W/mK]
3YSZ (比較材)	2.2 (1000℃、文献値)
$Mg_2SiO_4$	1.00
$Ni_2SiO_4$	2.13
$(Ca, Mg)_2SiO_4$	0.963
$(Mg, Co)_2SiO_4$	0.823

## 【0069】

表8に示すように、これらの材料の1000℃における熱伝導率はいずれもジルコニアのそれよりも小さいと推定でき、遮熱コーティングとして十分適していると考えられる。

## 【0070】

【表 9】

出版元: AMERICAN CERAMIC SOCIETY
書籍名: "PHASE DIAGRAMS FOR CERAMISTS" vol.1~6
編者: Ernst M. Levin, Carl R. Robbins, Howard F. McMurdie
出版年: Vol.1 1964年
Vol.2 1969年

図番	組成式	刊番	ページ	参照図
図 2	MgO-SiO <sub>2</sub> 系	Vol.1	112ページ	Fig. 266
図 3	Fe-Si-O系	Vol.1	59ページ	Fig. 80
図 4	Mn-Si-O系	Vol.1	65ページ	Fig. 101
図 5	NiO-SiO <sub>2</sub> 系	Vol.2	90ページ	Fig. 2324
図 6	Co-Si-O系	Vol.2	23ページ	Fig. 2120
図 7	FeO-MgO-SiO <sub>2</sub> 系	Vol.1	236ページ	Fig. 682
図 8	CaO-MgO-SiO <sub>2</sub> 系	Vol.1	210ページ	Fig. 598
図 9	FeO-MnO-SiO <sub>2</sub> 系	Vol.1	239ページ	Fig. 689
図 10	MgO-MnO-SiO <sub>2</sub> 系	Vol.1	242ページ	Fig. 699
図 11	MgO-NiO-SiO <sub>2</sub> 系	Vol.1	243ページ	Fig. 702

【0071】

[実施例 5]

本例では、先の実施例 1 中で、熱膨張率がジルコニアのそれよりも大きく、また熱伝導率がジルコニアのそれよりも小さいと推定できるため、遮熱コーティング材料として適していると述べた  $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$  を基に、その他の Nb を含む酸化物について同様に熱膨張率  $\alpha$ 、熱伝導率  $\lambda$  の検討を行った。また同じく実施例 1 中で述べた  $\text{La}_2\text{NiO}_4$  を基に、La の代わりに他の希土類元素、例えば Pr, Nd, Eu 等の La と同じく 3 価をとる希土類元素を置換した酸化物、さらに実施例 1 中で述べた  $\text{LaTaO}_4$  を基に La の代わりに他の 3 価の金属元素、例えば Al, V, Cr, Fe, Ga, Y, Rh, In, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu を置換した酸化物、およびその他の Ta を含む酸化物について同様に熱膨張率  $\alpha$ 、熱伝導率  $\lambda$  の検討を行った。ここで選定した材料は、Sr と Nb の比を変えた  $\text{Sr}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ 、 $\text{Sr}_5\text{Nb}_4\text{O}_{15}$ 、Sr に代わり同じアルカリ土類金属系である Ca を用いた  $\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ 、Sr の代わりに希土類元素を用いた  $\text{YNbO}_4$ 、 $\text{LaNbO}_4$  等の Nb を含む酸化物、 $\text{La}_2\text{NiO}_4$  中の La の代わりに Nd で置換した  $\text{Nd}_2\text{NiO}_4$ 、 $\text{LaTaO}_4$  中の La の代わりに Nd で置換した  $\text{NdTaO}_4$ 、および  $\text{Ca}_4\text{Ta}_2\text{O}_9$ 、 $\text{BaTa}_2\text{O}_6$  とした。それら材料を表 10 に示す。

【0072】

【表 10】

材料名	融点 [°C]
$\text{Sr}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$	1700
$\text{Sr}_5\text{Nb}_4\text{O}_{15}$	1475
$\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$	1571
$\text{YNbO}_4$	2000
$\text{LaNbO}_4$	1620
$\text{Nd}_2\text{NiO}_4$	1900
$\text{NdTaO}_4$	1900
$\text{Ca}_4\text{Ta}_2\text{O}_9$	1990
$\text{BaTa}_2\text{O}_6$	1875

## 【0073】

表 10 に示すように、これらの材料はすべて融点が 1400℃ 以上であり、遮熱コーティングとして使用可能な温度域での熱的安定性には問題がないと考えられる。

表 10 に掲げた材料を合成するにあたり、それぞれの構成元素の酸化物、水酸化物または炭酸塩を出発原料に選び、所定比となるように秤量し、ボールミルを用いて固相混合した。混合粉を乾燥した後、1400℃ で仮焼した。得られた仮焼粉を粉末 X 線回折により同定したところ、未反応原料成分は残っておらず、全ての試料で単相になっていることが確認された。次いで、上記各試料を 1500℃ で焼成し、その焼結体から 4×4×15 mm の棒状試料を切出して、熱膨張率を測定した。1000℃ における熱膨張率の値を表 11 に示す。なお比較材として 3YSZ の熱膨張率も表中に記載した。

## 【0074】

【表11】

材料名	熱膨張率 [ $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]
3YSZ (比較材)	9.92
$\text{Sr}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$	14.47
$\text{Sr}_5\text{Nb}_4\text{O}_{15}$	11.27
$\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$	12.06
$\text{YNbO}_4$	9.22
$\text{LaNbO}_4$	12.64
$\text{Nd}_2\text{NiO}_4$	14.05
$\text{NdTaO}_4$	9.87
$\text{Ca}_4\text{Ta}_2\text{O}_9$	7.38
$\text{BaTa}_2\text{O}_6$	7.79

## 【0075】

作製した試料のうち、 $\text{Sr}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ 、 $\text{Sr}_5\text{Nb}_4\text{O}_{15}$ 、 $\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ 、 $\text{LaNbO}_4$ において熱膨張率が3YSZのそれよりも大きな値を示している。このことは、これらの材料を遮熱コーティングとして使用した場合、下地の金属製部品との間に引張り応力を生じる可能性が現用のジルコニアよりも小さいということを示唆している。また $\text{YNbO}_4$ においても熱膨張率がジルコニアのそれよりも小さいとはいえほぼ同等であるため、遮熱コーティングとして使用した場合、下地の金属製部品との間に生じる引張り応力は、現用のジルコニアを使用した場合と同程度と推定でき、遮熱コーティング材料として熱膨張的には問題ないと考えられる。

## 【0076】

なお、本実施例では表11に掲げた9種類の試料についてのみ熱膨張率の測定を行ったが、 $\text{La}_2\text{NiO}_4$ におけるLaの代わりにNd以外の希土類元素、例えばPr, Euを置換した酸化物や、 $\text{LaTaO}_4$ におけるLaの代わりにNd以外の3価の金属元素、例えばAl, V, Cr, Fe, Ga, Y, Rh, In, Ce, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Luを置換した酸化物であっても、 $\text{Nd}_2\text{NiO}_4$ や $\text{NdTaO}_4$ と同様の結晶構造をとるため、同程度の大きさの熱膨張率を持つであろうことは容易に推測できる。

## 【0077】

次に、 $\text{Sr}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ 、 $\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ 、 $\text{YNbO}_4$ 、 $\text{Nd}_2\text{NiO}_4$ 、 $\text{NdTaO}_4$ 、 $\text{Ca}_4\text{Ta}_2\text{O}_9$ 、 $\text{BaTa}_2\text{O}_6$ について、1500℃で焼成し、その焼結体から直径10mmφ、厚さ1mmの円盤状試料を切出し、レーザーフラッシュ法により熱伝導率を測定した。室温における熱伝導率の値を表12に示す。なお比較材として3YSZの熱伝導率の値(1000℃、文献値)も表中に記載した。

## 【0078】

【表12】

材料名	熱伝導率 [W/mK]
3YSZ (比較材)	2.2 (1000℃文献値)
$\text{Sr}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$	1.02
$\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$	2.10
$\text{YNbO}_4$	1.95
$\text{Nd}_2\text{NiO}_4$	1.84
$\text{NdTaO}_4$	2.15
$\text{Ca}_4\text{Ta}_2\text{O}_9$	2.18
$\text{BaTa}_2\text{O}_6$	1.60

【0079】

実施例1中で述べたのと同様の考察を行い、先に示した式(2)により1000℃(1273K)における熱伝導率を推定すると、表13のようになる。

【0080】

【表13】

材料名	1000℃における推定熱伝導率 [W/mK]
3YSZ (比較材)	2.2 (1000℃文献値)
$\text{Sr}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$	0.255
$\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$	0.525
$\text{YNbO}_4$	0.488
$\text{Nd}_2\text{NiO}_4$	0.460
$\text{NdTaO}_4$	0.538
$\text{Ca}_4\text{Ta}_2\text{O}_9$	0.545
$\text{BaTa}_2\text{O}_6$	0.400

## 【0081】

表13に示すように、これらの材料の1000℃における熱伝導率はいずれもジルコニアのそれよりも小さいと推定でき、遮熱コーティング材料として適していると考えられる。

また、実施例2で説明した式(3)および(4)を用いることにより、熱膨張率、熱伝導率を制御することが可能であるため、表11および12に掲げた材料を2種類あるいはそれ以上複合化させた材料も、遮熱コーティング材料として十分適していると考えられる。同様に実施例1中の表1および2に掲げた材料と本実施例中の表11および12に掲げた材料とを2種類あるいはそれ以上複合化させた材料も、遮熱コーティング材料として十分適していると考えられる。

## 【0082】

なお、本実施例では表12に掲げた7種類の試料についてのみ熱伝導率の測定を行ったが、 $\text{La}_2\text{NiO}_4$ におけるLaの代わりにNd以外の希土類元素、例えばPr, Euを置換した酸化物や、 $\text{LaTaO}_4$ におけるLaの代わりにNd以外の3価の金属元素、例えばAl, V, Cr, Fe, Ga, Y, Rh, In, Ce, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Luを置換した酸化物であっても、 $\text{Nd}_2\text{NiO}_4$ や $\text{NdTaO}_4$ と同様の結晶構造をとるため、同程度の大きさの熱伝導率を持つであろうことは容易に推測できる。

## 【0083】

## [実施例6]

本例では、先の実施例1中で、熱膨張率がジルコニアのそれよりも大きく、また熱伝導率がジルコニアのそれよりも小さいと推定できるため、遮熱コーティング材料として適していると述べたSr-Nb系酸化物の固溶体を基に、 $\text{BaTa}_2\text{O}_6$ の固溶体、および $\text{LaNiO}_4$ の固溶体や、その他の類似化合物について同様に熱膨張率 $\alpha$ 、熱伝導率 $\lambda$ の検討を行った。ここで選定した材料は $\text{Ca}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ ,  $\text{Ca}_{11}\text{Nb}_4\text{O}_{21}$ ,  $\text{BaTa}_{1.8}\text{Ti}_{0.2}\text{O}_6$ ,  $\text{BaTa}_{1.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_6$ ,  $\text{Sr}_2\text{Nb}_{1.8}\text{Ti}_{0.2}\text{O}_7$ ,  $\text{Sr}_2\text{Nb}_{2-x}\text{Zr}_x\text{O}_7$ ,  $\text{Sr}_4\text{Nb}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_9$ ,  $\text{Sr}_4\text{Nb}_{1.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_9$ ,  $\text{La}_3\text{NbO}_7$ ,  $\text{DyNbO}_4$ ,  $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{NiO}_4$ ,  $\text{La}_6\text{WO}_{12}$ ,  $\text{Ce}_6\text{WO}_{12}$ ,  $\text{Dy}_6\text{WO}_{12}$ ,  $\text{Sm}_6\text{WO}_{12}$ ,  $\text{Yb}_6\text{WO}_{12}$ ,  $\text{Y}_6\text{WO}_{12}$ ,  $\text{Dy}_2\text{WO}_6$ ,  $\text{Yb}_2\text{WO}_6$ ,  $\text{SrYb}_2\text{O}_4$ ,  $\text{La}_6\text{WO}_{12}$ ,  $\text{Dy}_2\text{WO}_6$ とした。これらの材料を表14に示す。

## 【0084】

【表14】

材料名	融点 (°C)
$\text{Ca}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$	1700
$\text{Ca}_{11}\text{Nb}_4\text{O}_{21}$	2005
$\text{BaTa}_{1.8}\text{Ti}_{0.2}\text{O}_6$	1880
$\text{BaTa}_{1.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_6$	1890
$\text{Sr}_2\text{Nb}_{1.8}\text{Ti}_{0.2}\text{O}_7$	1705
$\text{Sr}_2\text{Nb}_{1.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_7$	1702
$\text{Sr}_4\text{Nb}_{1.8}\text{Ti}_{0.2}\text{O}_9$	1710
$\text{Sr}_4\text{Nb}_{1.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_9$	1700
$\text{La}_3\text{NbO}_7$	1900
$\text{DyNbO}_4$	1950
$\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{NiO}_4$	1857
$\text{La}_6\text{WO}_{12}$	2150
$\text{Ce}_6\text{WO}_{12}$	2030
$\text{Dy}_6\text{WO}_{12}$	2300
$\text{Sm}_6\text{WO}_{12}$	2240
$\text{Yb}_6\text{WO}_{12}$	2525
$\text{Y}_6\text{WO}_{12}$	2400
$\text{Dy}_2\text{WO}_6$	2200
$\text{Yb}_2\text{WO}_6$	2200

## 【0085】

表14に示すように、これらの材料はすべて融点が1700℃以上であり、中にはイットリアを固溶したジルコニアの融点以上である2500℃を超える融点のものもあり、遮熱コーティングとして使用可能な温度域での熱的安定性には問題がないと考えられる。

## 【0086】

次に、上記表15に掲げた材料を合成した。これらの材料を合成するにあたり、それぞれの構成元素の酸化物、水酸化物または炭酸塩を出発原料に選び、所定比となるように秤量し、ボールミルを用いて固相混合した。混合粉を乾燥した後、1400℃で仮焼した。得られた仮焼粉を粉末X線回折により同定したところ、未反応原料成分は残っておらず、全ての試料で単相になっていることが確認され、置換固溶を狙ったものについては各ピークを詳細に調べ、一定方向にピークシフトが認められて、添加固溶成分が結晶中に確実に固溶していることを確認した。次いで、上記各試料を1500℃で焼成し、その焼結体から4×4×15mmの棒状試料を切出して、熱膨張率を測定した。なお、一般的に類似化



合物、類似結晶構造をとるものであっても、その微妙な違いにより熱伝導率は大きく異なることが多いが、熱膨張率はそれほど大きく違うことは少ない。つまり、 $\text{Ca}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ 、 $\text{Ca}_{11}\text{Nb}_4\text{O}_{21}$  については $\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ と、 $\text{BaTa}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_6$ 、 $\text{BaTa}_{2-x}\text{Zr}_x\text{O}_6$ 、については $\text{BaTa}_2\text{O}_6$ と、 $\text{Sr}_2\text{Nb}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_7$ 、 $\text{Sr}_2\text{Nb}_{2-x}\text{Zr}_x\text{O}_7$  については $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ と、 $\text{Sr}_4\text{Nb}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_9$ 、 $\text{Sr}_4\text{Nb}_{2-x}\text{Zr}_x\text{O}_9$  については $\text{Sr}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ と、 $\text{La}_3\text{NbO}_7$ 、 $\text{DyNbO}_4$  については $\text{LaNbO}_4$ と、 $\text{La}_{2-x}\text{Ca}_x\text{NiO}_4$  については $\text{LaNiO}_4$ と、 $\text{Ce}_6\text{WO}_{12}$ 、 $\text{Dy}_6\text{WO}_{12}$ 、 $\text{Sm}_6\text{WO}_{12}$ 、 $\text{Yb}_6\text{WO}_{12}$ 、 $\text{Y}_6\text{WO}_{12}$  については $\text{La}_6\text{WO}_{12}$ と、 $\text{Yb}_2\text{WO}_6$  については $\text{Dy}_2\text{WO}_6$ と同等の熱膨張率の値となることが明らかであるので、ここでは省略することとし、 $\text{SrYb}_2\text{O}_4$ 、 $\text{La}_6\text{WO}_{12}$ 、 $\text{Dy}_2\text{WO}_6$  の1000℃における熱膨張率の値を表15に示す。なお比較材として3YSZの熱膨張率も表中に記載した。

【0087】

【表15】

材料名	熱膨張率 [ $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ]
3YSZ (比較材)	9.92
$\text{SrYb}_2\text{O}_4$	10.85
$\text{La}_6\text{WO}_{12}$	10.92
$\text{Dy}_2\text{WO}_6$	10.60

【0088】

表15に示すように、作製した試料のうち、 $\text{SrYb}_2\text{O}_4$ 、 $\text{La}_6\text{WO}_{12}$ 、 $\text{Dy}_2\text{WO}_6$  において熱膨張率が3YSZのそれよりも大きな値を示している。このことは、これらの材料を遮熱コーティングとして使用した場合、下地の金属製部品(母材)との間に引っ張り応力を生じる可能性が現用のジルコニアよりも小さいということを示唆している。

【0089】

次に、 $\text{Ca}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ 、 $\text{Ca}_{11}\text{Nb}_4\text{O}_{21}$ 、 $\text{BaTa}_{1.8}\text{Ti}_{0.2}\text{O}_6$ 、 $\text{BaTa}_{1.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_6$ 、 $\text{Sr}_2\text{Nb}_{1.8}\text{Ti}_{0.2}\text{O}_7$ 、 $\text{Sr}_2\text{Nb}_{2-x}\text{Zr}_x\text{O}_7$ 、 $\text{Sr}_4\text{Nb}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_9$ 、 $\text{Sr}_4\text{Nb}_{1.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_9$ 、 $\text{La}_3\text{NbO}_7$ 、 $\text{DyNbO}_4$ 、 $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{NiO}_4$ 、 $\text{La}_6\text{WO}_{12}$ 、 $\text{Ce}_6\text{WO}_{12}$ 、 $\text{Dy}_6\text{WO}_{12}$ 、 $\text{Sm}_6\text{WO}_{12}$ 、 $\text{Yb}_6\text{WO}_{12}$ 、 $\text{Y}_6\text{WO}_{12}$ 、 $\text{Dy}_2\text{WO}_6$ 、 $\text{Yb}_2\text{WO}_6$  について、1400℃で焼成し、その焼結体から直径10mmφ、厚さ1mmの円盤状試料を切出し、レーザーフラッシュ法により、熱伝導率を測定した。室温における熱伝導率の値を表16に示す。なお比較材として3YSZの熱伝導率の値(1000℃、文献値)も表中に記載した。

【0090】

【表16】

材料名	熱伝導率 [W/mK]
3YSZ (比較材)	2.2 (1000°C、文献値)
$\text{Ca}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$	2.06
$\text{Ca}_{11}\text{Nb}_4\text{O}_{21}$	2.01
$\text{BaTa}_{1.8}\text{Ti}_{0.2}\text{O}_6$	1.54
$\text{BaTa}_{1.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_6$	1.58
$\text{Sr}_2\text{Nb}_{1.8}\text{Ti}_{0.2}\text{O}_7$	1.49
$\text{Sr}_2\text{Nb}_{1.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_7$	1.50
$\text{Sr}_4\text{Nb}_{1.8}\text{Ti}_{0.2}\text{O}_9$	1.58
$\text{Sr}_4\text{Nb}_{1.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_9$	1.53
$\text{La}_3\text{NbO}_7$	1.91
$\text{DyNbO}_4$	1.84
$\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{NiO}_4$	1.83
$\text{La}_6\text{WO}_{12}$	1.83
$\text{Ce}_6\text{WO}_{12}$	1.92
$\text{Dy}_6\text{WO}_{12}$	1.84
$\text{Sm}_6\text{WO}_{12}$	1.88
$\text{Yb}_6\text{WO}_{12}$	1.92
$\text{Y}_6\text{WO}_{12}$	1.91
$\text{Dy}_2\text{WO}_6$	1.89
$\text{Yb}_2\text{WO}_6$	1.82

【0091】

以上に得られた結果から、実施例1中で述べたものと同様の考察を行い、先に示した式(2)により1000°C (1273 K) における熱伝導率を推定すると、表17のようになる。

【0092】

【表 17】

材料名	1000℃における推定熱伝導率 [W/mK]
3YSZ (比較材)	2.2 (1000℃文献値)
$\text{Ca}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$	0.515
$\text{Ca}_{11}\text{Nb}_4\text{O}_{21}$	0.503
$\text{BaTa}_{1.8}\text{Ti}_{0.2}\text{O}_6$	0.385
$\text{BaTa}_{1.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_6$	0.395
$\text{Sr}_2\text{Nb}_{1.8}\text{Ti}_{0.2}\text{O}_7$	0.373
$\text{Sr}_2\text{Nb}_{1.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_7$	0.375
$\text{Sr}_4\text{Nb}_{1.8}\text{Ti}_{0.2}\text{O}_9$	0.395
$\text{Sr}_4\text{Nb}_{1.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_9$	0.383
$\text{DyNbO}_4$	0.460
$\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{NiO}_4$	0.458
$\text{La}_6\text{WO}_{12}$	0.458
$\text{Ce}_6\text{WO}_{12}$	0.480
$\text{Dy}_6\text{WO}_{12}$	0.460
$\text{Sm}_6\text{WO}_{12}$	0.470
$\text{Yb}_6\text{WO}_{12}$	0.480
$\text{Y}_6\text{WO}_{12}$	0.488
$\text{Dy}_2\text{WO}_6$	0.473
$\text{Yb}_2\text{WO}_6$	0.455

## 【0093】

表16、表17に示したように、これらの材料の室温、1000℃における熱伝導率はいずれもジルコニアのそれよりも小さいと推定でき、遮熱コーティング材料として適していると考えられる。

また、実施例2で説明した式(3)および(4)を用いることにより、熱膨張率、熱伝導率を制御することが可能であるため、表15および表16に掲げた材料を2種類あるいはそれ以上複合化させた材料も、遮熱コーティング材料として十分適していると考えられる。同様に実施例1中の表1および表2に掲げた材料と本実施例中の表15および表16に掲げた材料とを2種類あるいはそれ以上複合化させた材料も、遮熱コーティング材料として十分適していると考えられる。

## 【0094】

なお、本実施例では表16に掲げた19種類の試料についてのみ熱伝導率の測定を行ったが、 $\text{La}_6\text{WO}_{12}$ 、 $\text{Dy}_2\text{WO}_6$ におけるLaの代わりにその他の希土類元素、例えばPr、Nd、Eu、Gd、Er等を置換した酸化物であっても、 $\text{La}_6\text{WO}_{12}$ や $\text{Dy}_2\text{WO}_6$ と同様の結晶構造をとるため、同程度の大きさの熱伝導率を持つであろうことは容易に推測できる。

【0095】

[実施例7]

本例では、先の実施例1中で、熱膨張率がジルコニアのそれよりも大きく、また熱伝導率がジルコニアのそれよりも小さいと推定した材料が、遮熱コーティング材料として適当であるとの検証試験を実施した。検証には適用先としてガスタービンの運転状況を想定し、最も大きな応力がかかる状態として起動・停止時に負荷される熱応力を考え、この熱応力による疲労現象を要素的に調べた熱サイクル試験を実施した。

【0096】

まず、組成 $\text{Ni}-16\text{Cr}-8.5\text{Co}-1.7\text{Mo}-2.6\text{W}-1.7\text{T}-0.9\text{Nb}-3.4\text{Al}-3.4\text{Ti}$  (at%)であるNi基耐熱合金を円板状に切出して試験片基材とした。そしてこの基材表面を $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粉末によりグリッドブラストした後、その上に金属結合層として $\text{Co}-32\text{Ni}-21\text{Cr}-8\text{Al}-0.5\text{Y}$  (at%)なる組成の $\text{CoNiCrAlY}$ 合金からなるボンドコート層を低圧プラズマ溶射法により形成し、この $\text{CoNiCrAlY}$ 合金のボンドコート層の上に大気圧プラズマ溶射法によりセラミックス層（遮熱コーティング材料で構成される皮膜）を積層して遮熱コーティング膜を形成して試験片とした。

なお、ボンドコート層（ $\text{CoNiCrAlY}$ 合金膜）の厚さは0.1mm、セラミックス層の厚さは0.5mmとした。

【0097】

次に、この試験片に対して、遮熱コーティング膜側の表面を大型の赤外線ランプを集光させて加熱し、表面温度が所定の温度にまで加熱されたらシャッターによりランプの光を遮断することにより冷却し、続いて所定の温度にまで冷却されたら再度シャッターを開けて加熱をする加熱/冷却サイクルを繰り返す熱サイクル試験を行った。

また、試験を短サイクルで終了させるために、加速化条件として試験片の加熱される反対側表面に対して約 $-20^\circ\text{C}$ の冷却空気をノズルから噴射して試験片全体を冷却した。これにより、試験片は遮熱コーティング膜と反対側の表面を中心としてほぼ $0^\circ\text{C}$ に冷却されるので、赤外線ランプにより加熱される際の遮熱コーティング膜側の表面以外は、常に全体が冷却されるようになる。そしてこのような温度差を意図的に付与することで、試験片には皮膜界面を中心とする非常に大きな熱応力が負荷されることになる。この試験を目視で遮熱コーティング面の剥離が確認されるまで行った。

【0098】

上記熱サイクル試験を、 $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ からなる遮熱コーティング膜を被覆した試料について行った。熱サイクル試験の条件として、試験片加熱面（遮熱コーティング膜表面）の最高温度を $1450^\circ\text{C}$ とし、最高界面温度（遮熱コーティング膜と基材との界面の最高温度）を $850^\circ\text{C}$ とする繰り返しの加熱を行った。その際、加熱時間1分、冷却時間1分の繰り返しとした。この熱サイクル試験の結果を表18に示す。また、比較のために $\text{YSZ}$ の遮熱コーティング膜の場合について併記した。

【0099】

【表 18】

材料名	遮熱コーティング膜表面が剥離するまでの回数
3 Y S Z (比較材)	80
$Sr_2Nb_2O_7$	600

## 【0100】

表 18 から明らかなように、 $Sr_2Nb_2O_7$  は遮熱コーティング用材料として優れた効果を有することが確認できた。これはこの材料が比較材よりも高い熱膨張率と低い熱伝導率を兼ね備えた結果であると考えられ、その他の材料に対しても同等の効果が認められるであろうことは容易に推測できる。

## 【産業上の利用可能性】

## 【0101】

本発明に係る遮熱コーティング材料によれば、高熱膨張率かつ低熱伝導率の遮熱コーティング膜を形成できる。係るコーティング膜をガスタービン等の耐熱保護膜に用いるならば、優れた耐熱性と耐久性とを得ることができ、もって燃焼ガスの高温化にも容易に対応可能な高性能のガスタービンを得ることができる。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0102】

【図 1】 遮熱コーティングの組織の模式図である。

【図 2】  $MgO-SiO_2$  系の状態図である。

【図 3】  $FeO-SiO_2$  系の状態図である。

【図 4】  $MnO-SiO_2$  系の状態図である。

【図 5】  $NiO-SiO_2$  系の状態図である。

【図 6】  $CoO-SiO_2$  系の状態図である。

【図 7】  $FeO-MgO-SiO_2$  系の状態図である。

【図 8】  $CaO-MgO-SiO_2$  系の状態図である。

【図 9】  $FeO-MnO-SiO_2$  系の状態図である。

【図 10】  $MgO-MnO-SiO_2$  系の状態図である。

【図 11】  $Mg_2SiO_4-Ni_2SiO_4$  系の状態図である。

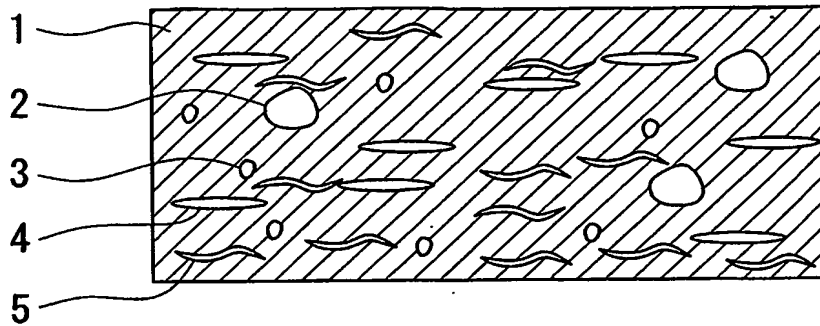
## 【符号の説明】

## 【0103】

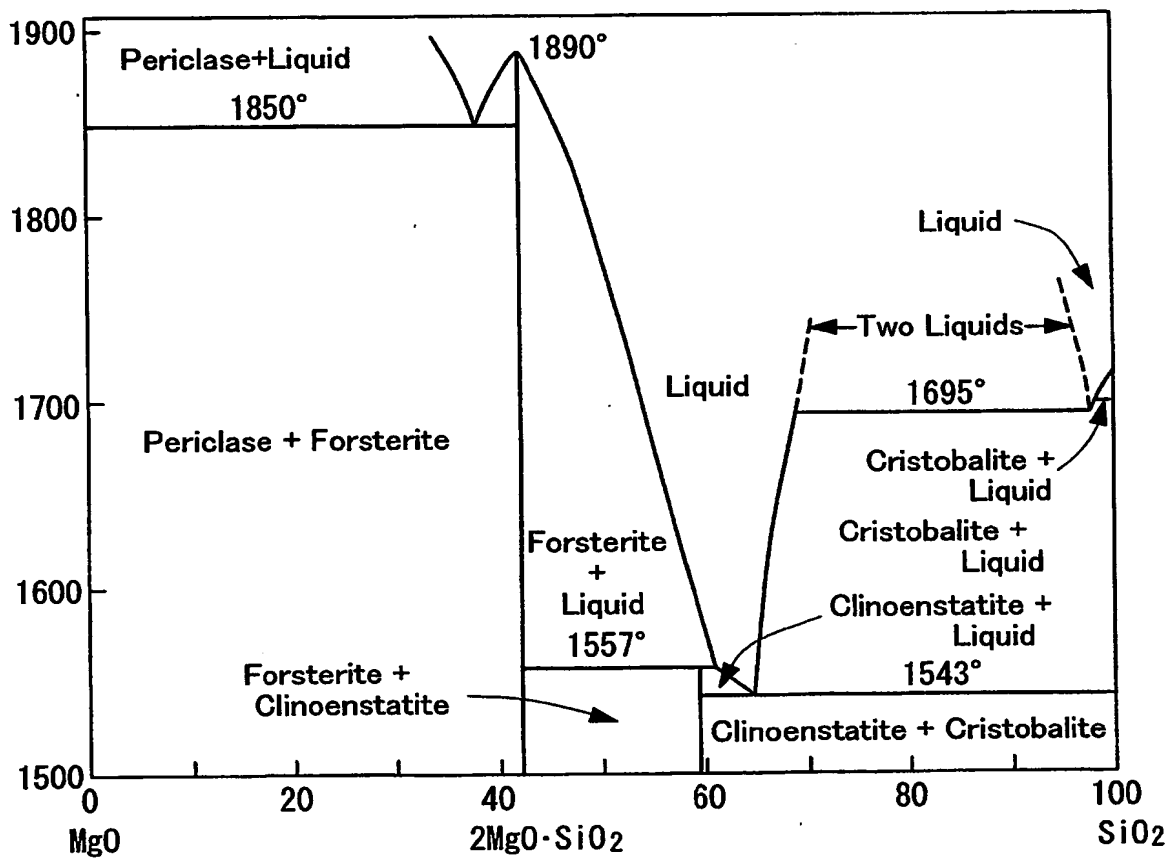
- |              |                       |                      |
|--------------|-----------------------|----------------------|
| 1    ジルコニア母材 | 2    数十 $\mu m$ 径の大気孔 | 3    数 $\mu m$ 径の小気孔 |
| 4    線状気孔    | 5    線状気孔             |                      |

【書類名】 図面

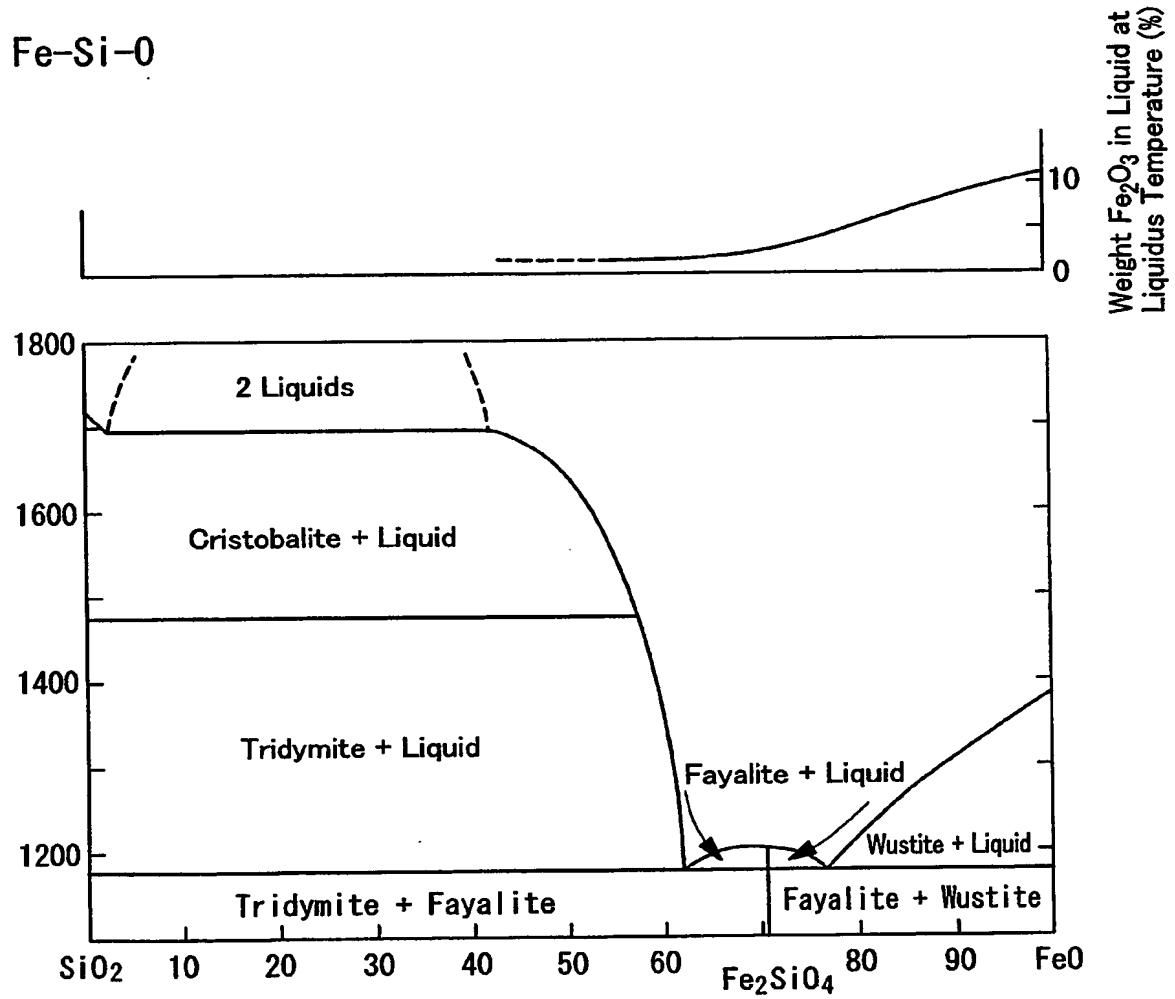
【図 1】



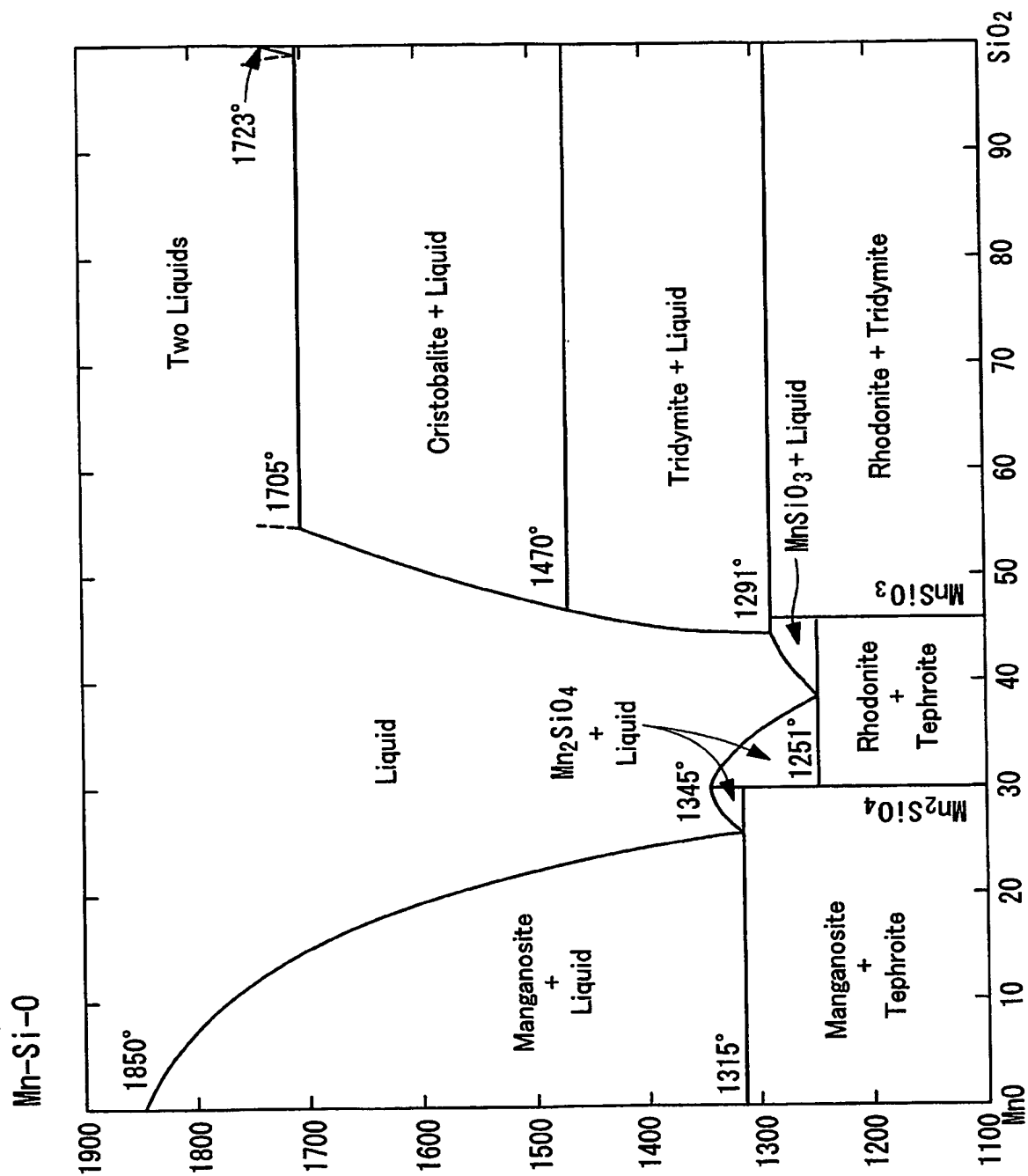
【図 2】

MgO-SiO<sub>2</sub>

【図 3】

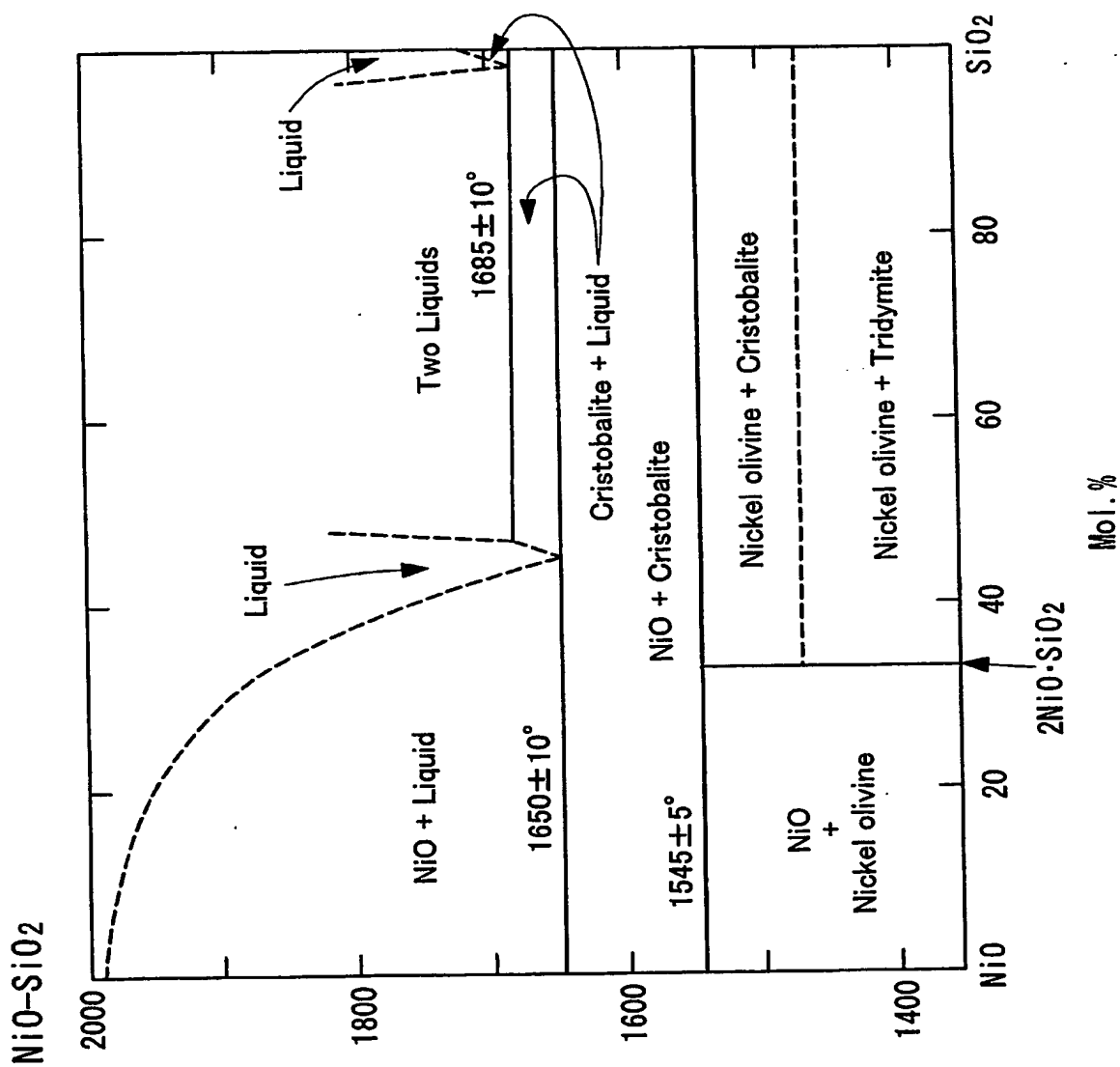


【図 4】

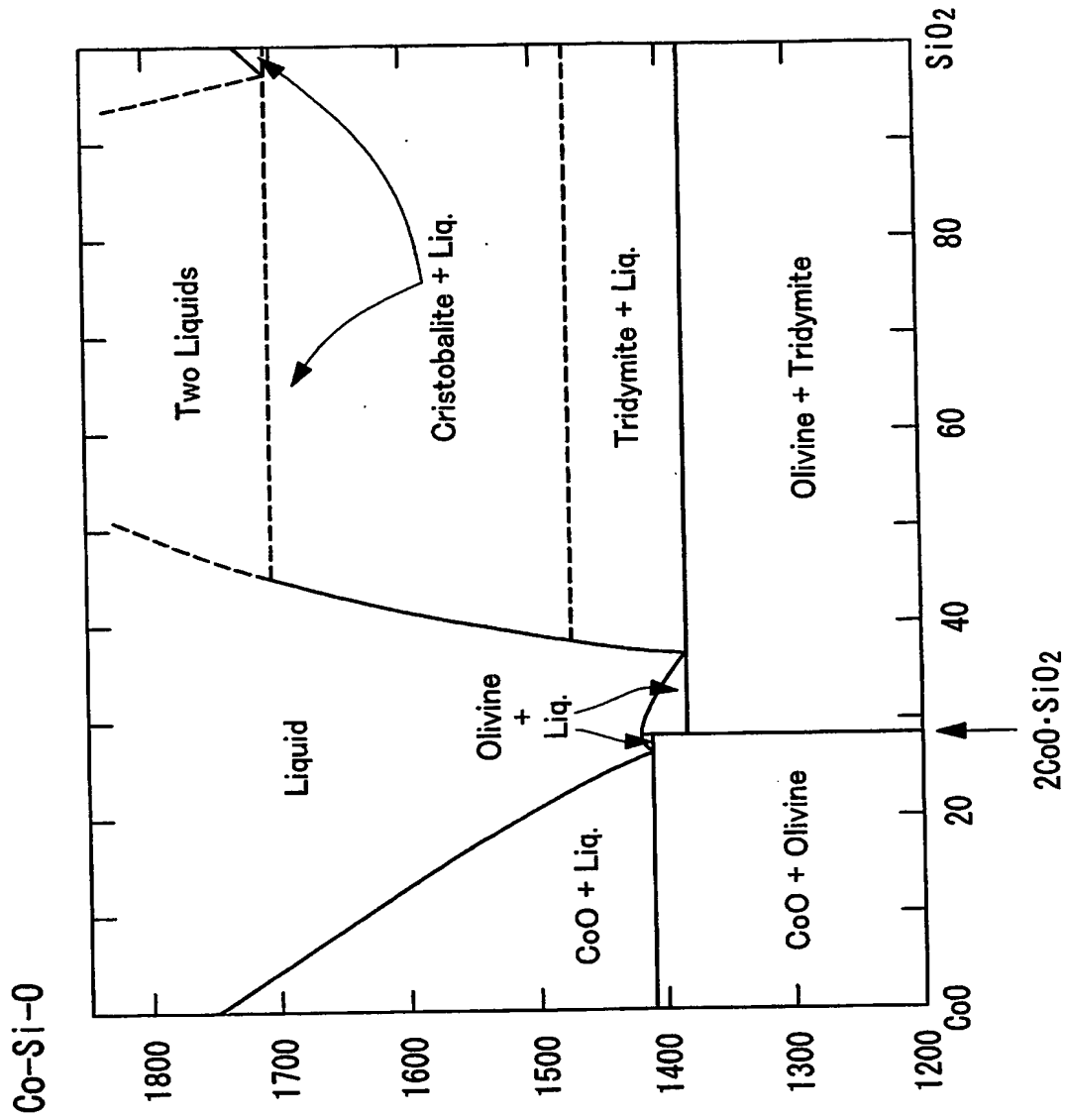




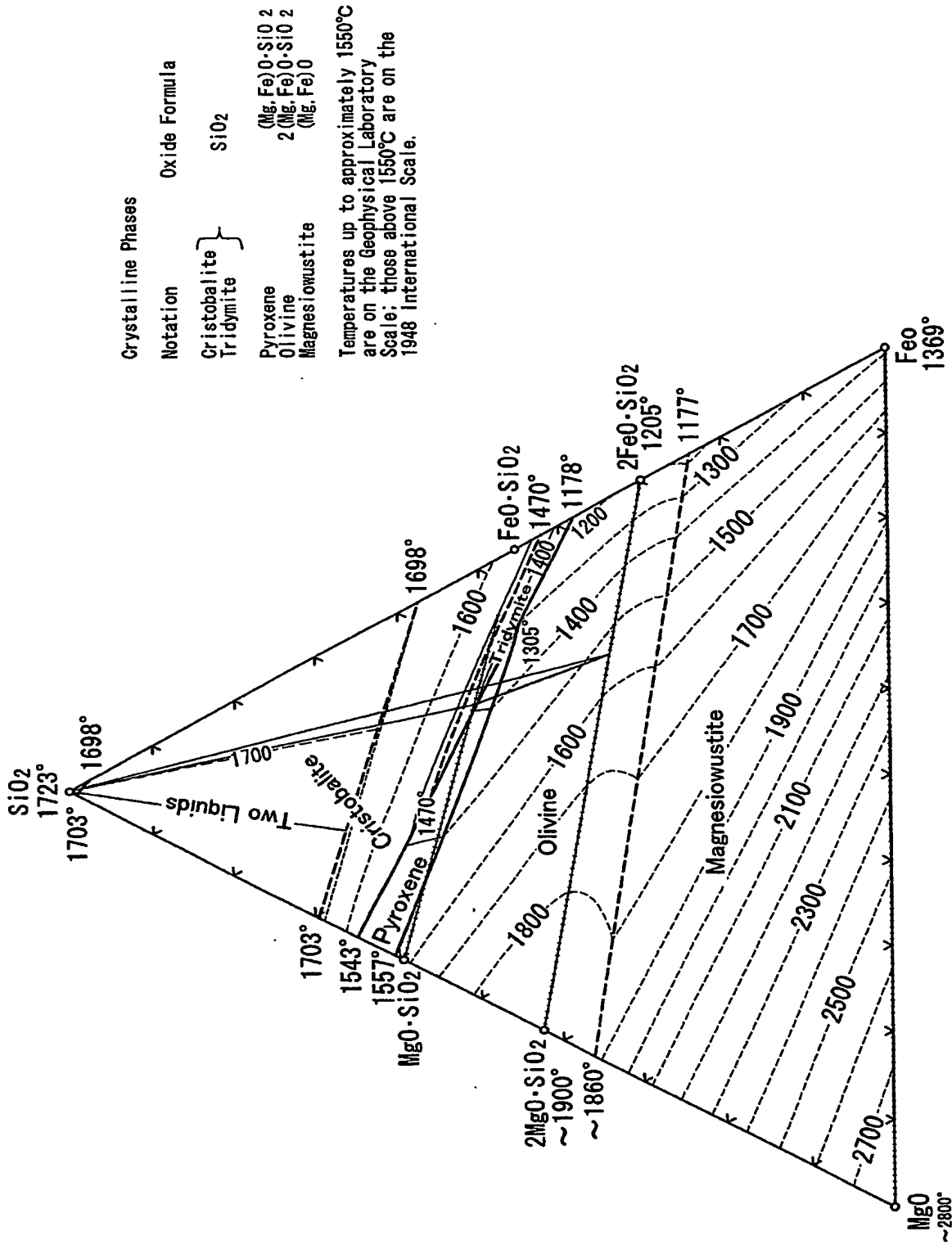
【図 5】



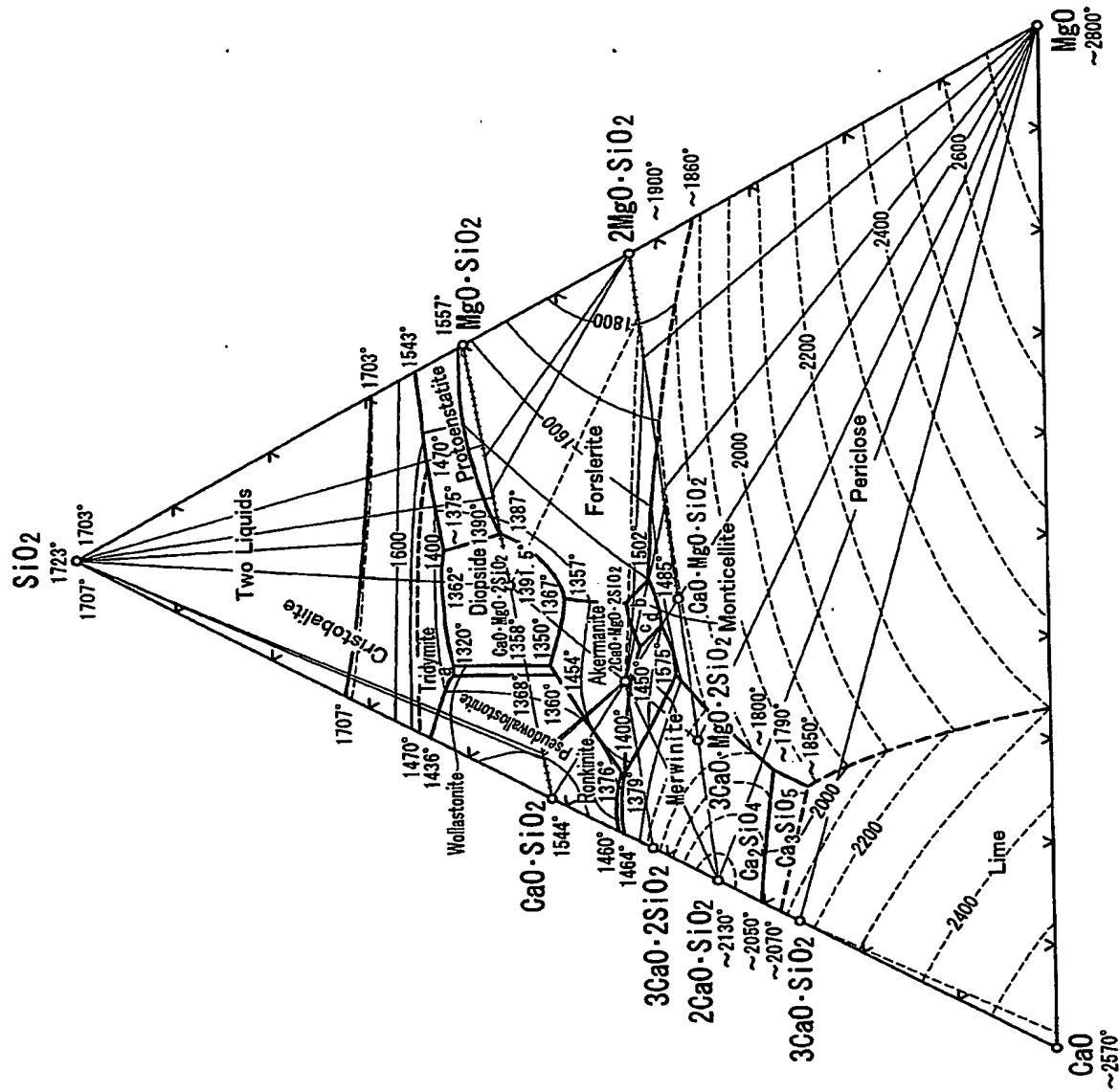
【図 6】



【図 7】

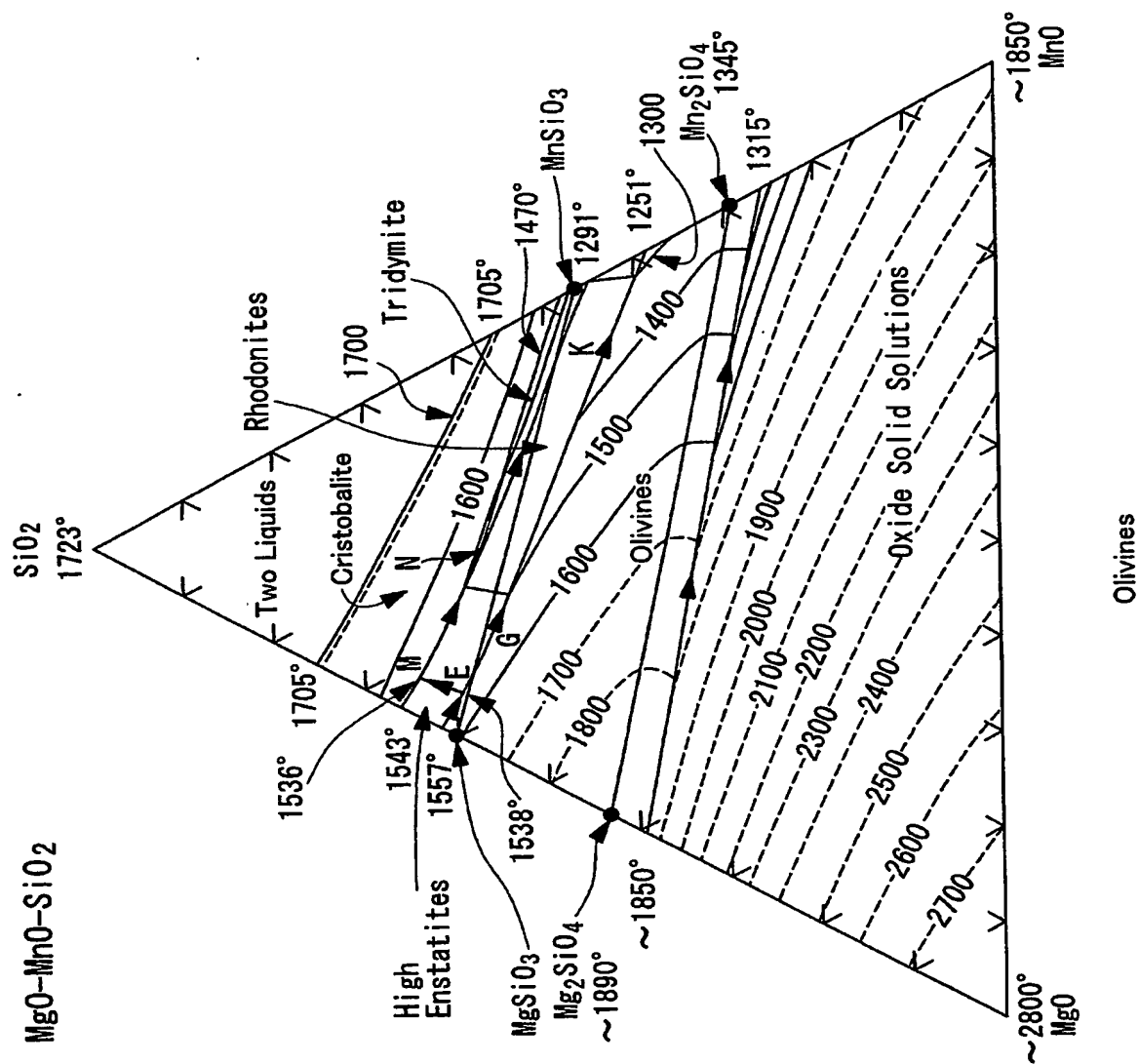


【図8】

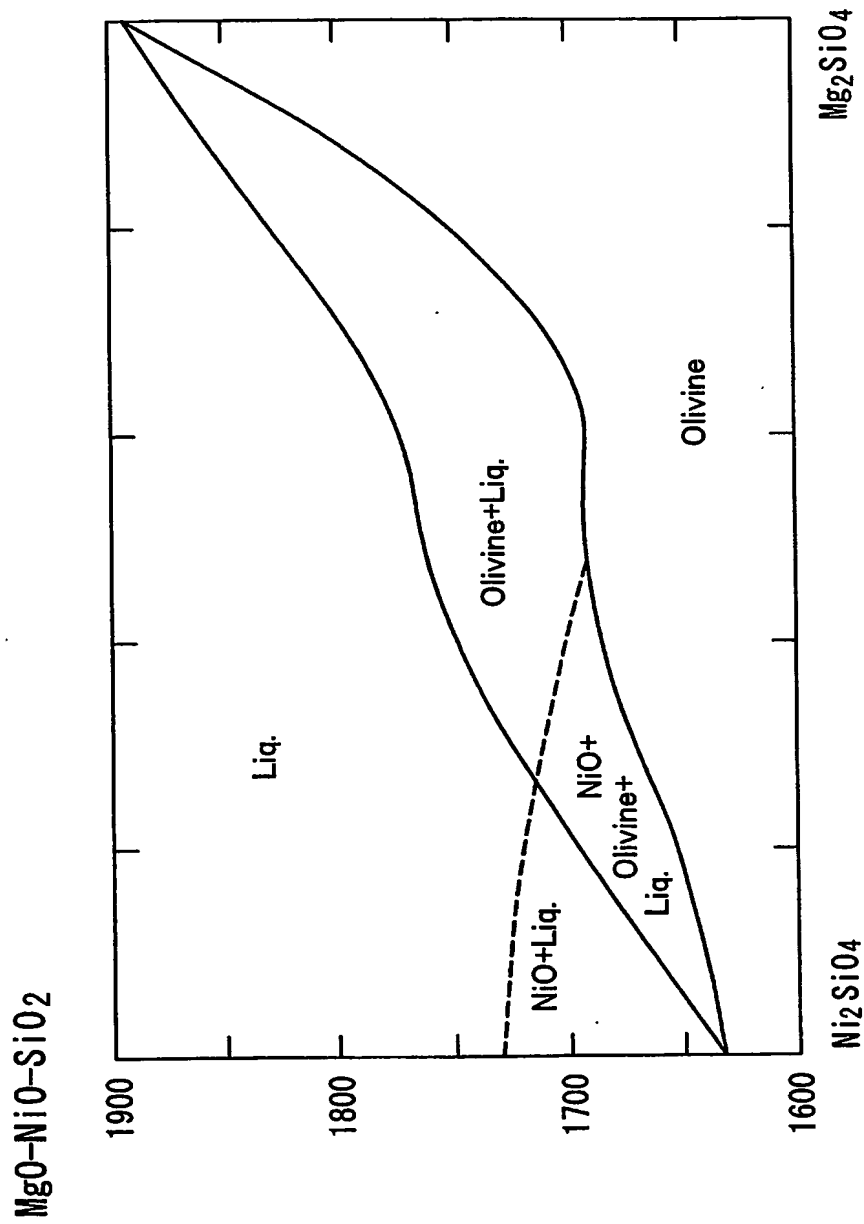




【図 10】



【図 11】



## 【書類名】要約書

## 【要約】

【課題】 相転移といった問題を抱えず、融点が使用温度域よりも高く、熱伝導率がジルコニアのそれよりも小さく、かつ熱膨張率がジルコニアのそれよりも大きい、新規の遮熱コーティング材料を提供する。

【解決手段】 本発明の遮熱コーティング材料は、ペロブスカイトから派生した斜方晶あるいは単斜晶構造（例えば組成式  $A_2 B_2 O_7$  で表される板状ペロブスカイト構造）、あるいは  $c$  軸/ $a$  軸比が 3 以上である正方晶の層状構造（例えば  $K_2 Ni F_4$  構造や  $Sr_3 Ti_2 O_7$  構造、 $Sr_4 Ti_3 O_{10}$  構造）を有する組成物、さらには組成式  $LaTaO_4$  で表される組成物、さらにまた、組成式  $M_2 SiO_4$  もしくは  $(MM')_2 SiO_4$ （ただし  $M, M'$  は 2 価の金属元素）で表されるオリビン型構造を有する組成物を主体として含む遮熱コーティング材料である。

【選択図】 なし



特願 2004-061427

出願人履歴情報

識別番号

[000006208]

1. 変更年月日

2003年 5月 6日

[変更理由]

住所変更

住 所

東京都港区港南二丁目16番5号

氏 名

三菱重工業株式会社